



## **Energi til fremtiden**

med Risø fra atomkraft til Bæredygtigt Energi

**Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi, Roskilde**

*Publication date:*  
2008

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi, R. (2008). *Energi til fremtiden: med Risø fra atomkraft til Bæredygtigt Energi*. Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi.

---

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



MORTEN JASTRUP (RED.)

## Energi til fremtiden – med Risø fra atomkraft til bæredygtig energi

RISØ NATIONALLABORATORIET FOR BÆREDYGTIG ENERGI

Energi til fremtiden

---

## **Energi til fremtiden**

- med Risø fra atomkraft til bæredygtig energi

Copyright © Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi,  
Danmarks Tekniske Universitet 2008

Udgivet af:

Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi  
Danmarks Tekniske Universitet

Postboks 49  
4000 Roskilde

Email: [infserv@risoe.dk](mailto:infserv@risoe.dk)  
[www.risoe.dtu.dk](http://www.risoe.dtu.dk)

ISBN: 978-87-550-3669-7

ISBN: 978-87-550-3670-3 (internet)

Printed in Denmark 2008

Redaktør: Morten Jastrup/Mothership Media

Redaktion: Lars Dahlagér, Maria Lund Jensen,

Jeanette Ringkøbing Rothenborg,

Michael Rothenborg

Design: Marianne Dunker-Jensen/Sans Grafisk Design

Bogen er sat med Neo Sans

Tryk: Schultz Grafisk

Oplag: 3.000

Publikationen kan downloades på Risøs hjemmeside:

[www.risoe.dtu.dk](http://www.risoe.dtu.dk)

**Bogens titel:** Bogens titel er inspireret af Risøs opgave, der ved 50 års jubilæet er forbløffende tæt på at være den samme som den opgave, der blev givet Risø ved åbningen i 1958. Risø skal først og fremmest – dengang som nu – være det sted, hvor fremtidens energiteknologier udvikles. Ved åbningen i 1958 var det atomkraft. Ved 50 års jubilæet er det en palet af bæredygtige energikilder, som Risø arbejder med.

**Omslagsfoto:** Poppelalléen, der er Risøs 'hovedvej'. Alléen er som resten af landskabet på Risøs 262 hektar store område anlagt af havearkitekt C. Th. Sørensen.

## Energi til fremtiden

---

– med Risø fra atomkraft til bæredygtig energi



# Indhold



<b>FORORD</b>	<b>6</b>
<b>FRA ATOMKRAFT TIL BÆREDYGTIG ENERGI</b> Risøs historie fra atomforsøgsanlæg til nationallaboratorium for bæredygtig energi	<b>8</b>
<b>RISØ STØBER KUGLERNE TIL VINDMØLLEEVENTYR</b> Vindenergi blev i starten mødt med modstand på Risø, men blev til den største succes	<b>16</b>
<b>VARME CELLER LAVER STRØM</b> Brændselsceller og brint er hovedelementer i fremtidens energisystem. Risø er med i front med begge dele	<b>26</b>
<b>BRÆNDELSSTAVE BANEDE VEJ FOR BIOLOGIEN</b> Biobrændsel og biomaterialer har rødder i Risøs forskning i kernekraft.	<b>36</b>
<b>BROBYGGERE - FRA FORSKNING TIL FORRETNING</b> Risøs mangeårige samarbejde med industrien har i de senere året et nyt perspektiv med Risøs Innovations Aktiviteter	<b>44</b>
<b>NATURENS KRAFTVÆRK SKAL TØJLES</b> Fusionsenergi kan blive fremtidens store energikilde. Risø har en lang tradition for forskning i fusion	<b>48</b>



<b>PLAST HAR BRAGT SOLEN TIL RISØ</b>	<b>54</b>
Plastsolceller er Risøs seneste bud på en ny energiteknologi	
<b>STRÅLINGSFORSKNING KAN REDDE MENNESKELIV</b>	<b>60</b>
Forskning i stråling er fortsat et vigtigt arbejdsområde på Risø	
<b>UNDERVISNING SPREDER VIDEN</b>	<b>68</b>
Fusionen med DTU giver Risø nye muligheder på undervisningsområdet	
<b>REAKTORERNE OVERLEVEDE ATOMKRAFTEN</b>	<b>72</b>
Risøs atomforsøgsreaktorer var afgørende for udviklingen af materialeforskningen	
<b>RISØ FIK STYR PÅ HELHEDEN</b>	<b>80</b>
Energisystemer bliver mere og mere komplekse, Risø har siden 70'erne skabt overblik og udarbejdet planer	
<b>KLIMAET ER BLEVET DET NYE PROJEKT</b>	<b>88</b>
Risø har en central placering i FN's arbejde med klimaudviklingen og i forskningen i klimateknologiske løsninger	

# Forord

6

**NÅR RISØ DEN 6. JUNI** har 50 års jubilæum, er det en betydelig del af dansk forsknings- og samtids-historie, der kan ses tilbage på. Risø har siden starten i 1958 været en aktiv – og til tider omstridt – del af den danske forsknings- og energidiskussion. Udgangspunktet var atomkraften, men Risø har på de 50 år været gennem en række forandringer, og den oprindelige fokus på atomkraft har knopskudt i mange retninger. Nogle af disse skud har været livskraftige og eksisterer stadig enten på eller uden for Risø. Andre har fået et par år til at vise vækst, men har skuffet og er blevet skåret af igen.

Trods denne forgrening og lejlighedsvis trimning er Risø efter 50 år tæt på at have tegnet en fuld cirkel og er på sin vis tilbage ved udgangspunktet i rollen som den, der mere end nogen anden i landet skal besvare et af tidens helt store spørgsmål: hvordan skal vi få energi til fremtiden? I 1958 handlede det om at udvikle atomenergi, der kunne gøre Danmark mindre afhængig af importeret olie og dermed sikre energi til tidens vækst, til store omstillinger i bo- og arbejdsmønstre og til udbygningen af velfærdsstaten. Det lykkedes, selv om man undervejs valgte atomenergien fra, og to store oliekriser satte hele energisystemet under pres. Risø har bidraget hele vejen med alt fra nye teknologier til vindmøller, bedre fyringsteknik til kraftværker og planer, der kunne sikre, at vi til enhver tid har den varme og elektricitet, vi har brug for.

I Risøs første 30 år var det først og fremmest hensynet til forsyningssikkerheden, der drev forskningen. Samfundet havde brug for en stabil strøm af megawatt-timer for at fungere. Det kunne Risø bidrage til. Men fra midten af 1980'erne rejste en ny dagsorden sig. Nu var det ikke nok at skaffe energi. Energien skulle være bæredygtig. Også den udfordring tog Risø op med fokus på mulighederne for det danske samfund, herunder også dansk erhvervsliv.

Den 1. januar 2007 blev Risø en del af Danmarks Tekniske Universitet. Og Risø DTU er i dag Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Det giver nye muligheder for Risø som sådan og for den enkelte medarbejder. Medarbejderne får mulighed for varierede karriereforløb inden for DTU-koncernen. Og Risø kan på en langt smidigere måde trække på kompetencer andre steder på universitetet og dermed styrke den forskningsmæssige indsats for at forfølge nationale og internationale strategiske mål. Sidst men ikke mindst får Risø som en del af et universitet øgede muligheder for at bidrage til samfundet gennem undervisning.





I forbindelse med at Risøs profil er blevet skærpet til bæredygtig energi, har der været dele af Risøs arbejde, der nu organisatorisk passer bedre ind andre steder på DTU, og som derfor er blevet integreret i institutter på DTU. Det er naturligvis vemodigt at sige farvel til mangeårige kolleger, men perspektiverne for deres forskningsfelter er større andre steder inden for DTU.

Risø benyttede sit 40-årsjubilæum i 1998 som en anledning til at få skrevet Risøs historie i en sådan form at værket kunne bidrage til den moderne danmarkshistorie. Opgaven blev lagt i hænderne på fire videnskabs- og teknologihistorikere og resulterede i det 560-sider store værk "Til samfundets tarv, - Forskningscenter Risøs historie".

50-årsjubilæet bruger vi også som anledning til en bogudgivelse - denne gang skrevet og redigeret af videnskabsjournalister. Denne bog giver et blik ind i, hvad Risø er i dag, og hvordan Atomenergi-kommissionens Forsøgsanlæg Risø og senere Forskningscenter Risø har udviklet sig igennem de sidste 50 år. Hovedparten af bogen består af en række kapitler, der hver især beskriver et eller flere af Risøs arbejdsfelter og deres historie her på stedet. Disse kapitler er først og fremmest bygget på interview med medarbejdere på Risø. Flere kunne have været interviewet og flere gode historier ville så være kommet frem i denne bog. Men selv om begrænsningens kunst er svær, er den nødvendig.

Bogen har også et historisk kapitel, der genfortæller Risøs historie set fra oven med fokus på de tidspunkter i Risøs historie, hvor der er sket afgørende ændringer. Disse to synsvinkler supplerer hinanden. Et historisk kapitel på den måde, det er forfattet her i bogen, vil altid have en tendens til at fokusere på de tidspunkter, hvor der er diskussioner og strid. Til gengæld vil kapitlerne om de enkelte arbejdsfelter have en tendens til at blive smittet af begejstringen for arbejdet og dets resultater. Jeg håber, at man som læser vil føle, at bogen i alt giver en balanceret beskrivelse af, hvad Risø er i dag, og hvad Risø har været gennem de sidste halvtreds år.

God læselyst.

Henrik Bindslev  
Konst. direktør



## Fra atomkraft til bæredygtig energi



**DET VAR EN** festlig dag, da Forsøgsanlæg Risø blev indviet den 6. juni 1958. Kongeparret var til stede, og både finansminister Kampmann og dansk forsknings nationalikon Niels Bohr holdt taler. Risø skulle indvies med manér. Ser man på baggrunden, er det ikke så sært. Ikke blot var Risø en af landets hidtil største forskningssatsninger – Risøs budget udgjorde en betragtelig del af den samlede danske tekniske forskning. Det var også – og det blev der især i medierne bidt mærke i – det sted, der bragte atomteknologien til landet. Danmark var på vej ind i en teknologisk domineret tidsalder, og Risø var den nye tids brohoved.

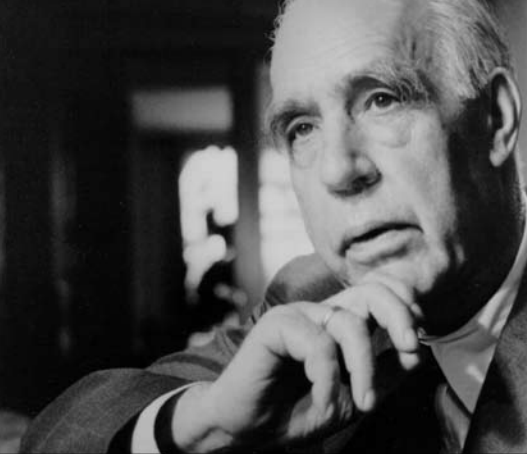


Risø blev etableret med ambitionen om at skaffe billig energi til industrialisering og vækst i det danske samfund. Fokus er stadigvæk på energi til fremtiden - nu er fortegnet bæredygtighed.

Forud for indvielsens højtideligheder lå der omtrent to et halvt års diskussioner og lejlighedsvis brydekampe i Atomenergikommissionen, det organ, der styrede Risø under opbygningen og frem til 1976. Kommissionen byggede på det Atomenergiudvalg, som Akademiet for de Tekniske Videnskaber (ATV) havde nedsat i starten af 1954. Akademiet havde set ud i verden og fået øje på de voksende forventninger til, at billig atomenergi ville drive en udvikling mod øget industrialisering, vækst og velfærd. Den amerikanske præsident Eisenhowers tale til FN om Atomer for Fred i december 1953, og det efterfølgende internationale samarbejde om udviklingen af civil atomkraft var nok det mest markante udtryk for denne udvikling.

Frygten for at Danmark skulle sakke bagud i udviklingen af atomkraft – samt en udtalt bekymring i samfundet for, at man var meget afhængig af import af olie – fik ATV til at nedsætte Atomenergiudvalget bestående af professorerne Niels Bohr, J.C. Jacobsen og Thorkild Bjerge. Den unge ingeniør Halldor Topsøe var fjerdemand. Udvalgets opgave blev at undersøge mulighederne for industriel udnyttelse af atomkraft. Allerede få måneder efter det blev dannet, tog udvalget kontakt til myndighederne i USA og Storbritannien for at høre, om de ville levere uran og reaktorer til et dansk forsøgsanlæg for atomenergi. Svarene var positive, sandsynligvis ikke mindst på grund af Niels Bohrs internationale anseelse, men udvalget havde ikke myndighed til at indgå aftalen selv. Der skulle den danske regering med.

Finansminister Viggo Kampmann tog ideen om et atomforsøgsanlæg til sig, og i marts 1955 nedsatte regeringen Atomenergikommissionen (AEK), hvor de fire medlemmer af ATV's udvalg blev sup-



Niels Bohr. Nobelpristageren spillede en afgørende rolle som formand for Atomenergikommissionen (AEK), der stod for planlægningen og opbygningen af Risø. Bohr var formand for AEK til sin død i november 1962.

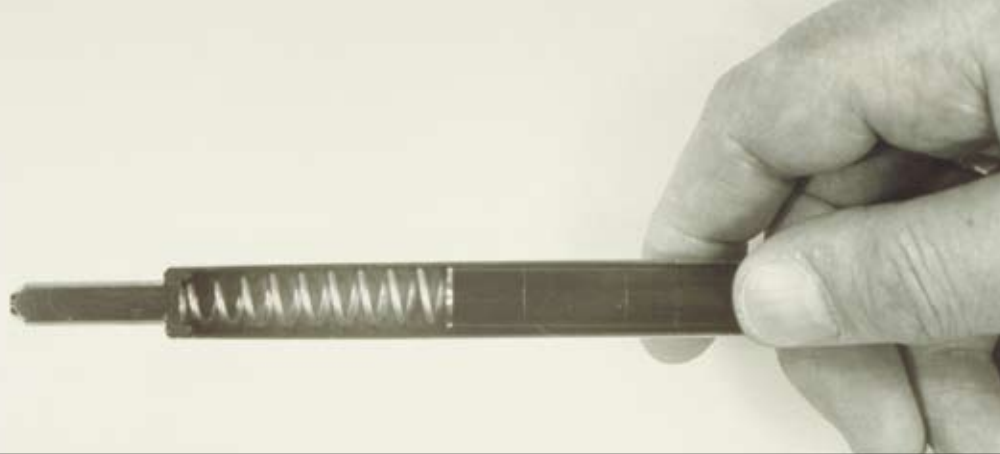
pleret med 11 nye medlemmer, fortrinsvis fra industrien og forskningsverdenen. Som officielt organ kunne kommissionen følge forhandlingerne med amerikanerne og briterne til dørs, og i juni 1955 blev der indgået samarbejdsaftaler.

Opbygningen af Atomenergikommissionen og senere Risø og arbejdet med at skabe politisk opbakning til projektet blev i høj grad håndteret i et samarbejde mellem kommissionens formand, Niels Bohr, og formanden for kommissionens forretningsudvalg, departementschef Hans Henrik Koch. Bohr og Koch havde kendt hinanden siden 1946, hvor nobelpristageren havde kontaktet departementschefen. H.H. Koch havde skabt sig betydelig respekt i de sidste år af krigen, hvor han som departementschef blandt andet havde arbejdet for at hjælpe danske kz-fanger og senere få dem transporteret hjem via den svenske Bernadotte-aktion. Bohr opsøgte ham for at få hjælp fra en person med gode politiske kontakter, og de to udviklede et nært forhold i de kommende år. Kochs politiske kontakter og Bohrs brede anseelse gav dem den nødvendige pondus til at lede Risø igennem en opbygningsfase, hvor budgettet voksede langt ud over rammerne, og Atomenergikommissionen blev ramt af sine første interne skænderier – om indkøbet af en tredje reaktor. Flere skulle følge.

### ATOMENERGI - TIL HVAD NYTTE?

Elværkerne havde fra starten en stor plads i Atomenergikommissionen med tre ud af 15 poster. I de første år efter Risøs indvielse voksede uenigheder i AEK langsomt frem, særligt som følge hastigt voksende budgetter. Elværkernes repræsentanter blev i stigende grad kritiske over for Risøs arbejde, og i 1963, kort tid efter at Niels Bohr var død, kastede de kommissionen ud i dens hidtil værste krise. Der ville ikke blive bygget atomkraftværker i Danmark inden for overskuelig fremtid, meldte de ud offentligt. Prisen var for høj sammenlignet med kul- og oliefyrede værker. Og – hvilket måske var det værste for Risø – hvis a-kraft skulle blive aktuel i Danmark, ville elværkerne ikke gå til Risø. De ville købe et gennemprøvet system i udlandet.

Danmarks Teknisk-Videnskabelige Forskningsråd (DTVF) fulgte op og erklærede, at så måtte Risø ændre formål og ledelse. DTVF havde i flere år ligget i mere eller mindre åben konflikt med Atomenergikommissionen om kontrollen over Risø. Rådet skulle sikre, at dansk teknisk forskning var fremsynet, og Risøs enorme bevillinger var en torn i øjet på mange, ikke mindst fordi det drænedes teknisk uddannet personale fra andre institutioner og virksomheder. Men det var i loven ikke klart, om Atomenergikommissionen og dermed Risø lå under DTVF's kompetence eller ej. Nu forsøgte DTVF at få omdefinere Risø til en erhvervsforskningsinstitution, men hårdt lobbyarbejde fra især H.H. Kochs side fik endnu



Gennemskåret ende af en brændselsstav til en kraftværksreaktor. Denne type stave skulle tåle temperaturer omkring 300 grader Celsius. Fra 1966 testede Risø sammen med Helsingør Skibsværft og Maskinbyggeri denne type brændselsstave i to udenlandske reaktorer.

en gang overbevist Folketingets politikere om, at en institution som Risø var nødvendig, og officielt kunne institutionen fortsætte arbejdet mere eller mindre som hidtil.

Konflikten fik dog vidtrækkende konsekvenser. Samarbejdet med elværkerne blev i de kommende år ikke bedre. Risøs store prestigeprojekt – udviklingen af en særlig type reaktor – havde været nødlidende i et par år og blev endeligt lukket i 1964. Forsøget på derefter at koble sig på et svensk projekt fik kun fire år, før det stoppede i 1968. Uenighed mellem Risø og elværkerne var også en vigtig grund til dette. På Risø blev konflikten i 1963 på mange måder starten på en arbejdsmetode, der siden har været forfulgt med stort held på Risø. Man udvidede samarbejdet med virksomheder og institutioner uden for Risø – både i Danmark og internationalt. Regeringen havde nok støttet Risø, men havde også opfordret til, at man kom i bedre kontakt med industrien. Flere af afdelingerne startede i årene efter 1963 samarbejder om udvikling og produktion, bl.a. af udstyr til strålesterilisering af medicinsk udstyr og samarbejde om udvikling af brændselselementer med Helsingør Skibsværft og Maskinfabrik.

Trods tiltagene fortsætter kritikken af Risø for at være for stor, for dyr og for formålsløs. I 1966 var Risøs fremtid igen på den politiske dagsorden, men det lykkedes også denne gang at skabe opbakning til at fortsætte.

## JA OG NEJ TAK TIL ATOMKRAFT

De sidste år i 1960'erne og starten af 1970'erne var mere rolige. Der kom stille og roligt mere gang i samarbejdet udadtil, og forholdet mellem Risø og elværkerne blev bedre. Elværkerne havde slået fast, at de – ikke AEK – bestemte, om og hvornår der skulle bygges a-kraft-værker i Danmark. Til gengæld erkendte de, at de havde brug for Risøs ekspertise til planlægning og opstart af eventuelle værker. Og så – den 17. oktober 1973 – så det hele pludselig ud til endelig at blive virkelighed. Yom Kippur-krigen i Mellemøsten udløste den første store oliekrise. På få måneder blev olieprisen næsten firedoblet, og pludselig kunne elværkerne se en mening med atomkraften. Det kunne man også på Risø, og i de næste par år prioriterede man igen arbejdet med atomkraft, ikke for at bygge en egen reaktor denne gang, men for at kunne give den bedst mulige rådgivning om placering, opbygning, drift og sikkerhed i forbindelse med fremtidige a-kraftværker.

Planerne om atomkraft var langt fremme, første reaktor skulle åbne i 1980 – hurtigere kunne det næppe gøres – men modstanden mod kernekraften begyndte også at tage form, og i den efterfølgende debat kom Risø til at spille en væsentlig rolle. Flere medarbejdere var aktive skribenter, der forsvarede atomkraft og i en række indlæg påpegede fejl og mangler ved modstandernes argumenter. Dette

Området ved Risø set over vandet. Skal man rundt på Risø er der låncykler til rådighed. Th. Risø's 123 meter høje meteorologimast. Masten kom i drift i 1957. Målinger herfra er brugt i bla. Risø's risikoberedskab, i meteorologernes arbejde – blandt andet med at beregne potentialet for vindkraft og belastningerne på Storebæltsbroen.

fik igen visse medier til at kritisere Risø for at agitere for atomkraft og forsøge at kvæle debatten. I 1976 valgte Folketinget at udskyde en beslutning om atomkraft i Danmark. Samme år varslede også store ændringer på Risø. Sommeren året før var H.H. Koch gået af efter 20 år som formand for forretningsudvalget i AEK. Hans afløser, departementschef Erik Ib Schmidt bad medarbejderne nedtone deres rolle i atomkraftdebatten, og scenen var sat til forandringer.

Risø havde i atomkraftdebatten mistet en god portion goodwill i dele af mediebildet. En kritisk rapport fra Statsrevisorerne, der hæftede sig ved, at arbejdet på Risø havde fjernet sig betragteligt fra udgangspunktet, uden at strukturen var fulgt med, gjorde ikke stemningen bedre. Atomkraftdebatten skabte samtidig et ønske blandt politikerne på Christiansborg om en egentlig energipolitisk kritik af Risø's struktur. Man var nervøs for om Atomenergikommissionens medlemmer hyttede deres egne interesser i stedet for samfundets. Resultatet blev Lov om energipolitiske foranstaltninger fra 1976. Her blev AEK opløst. Risø fik i stedet en bestyrelse med Erik Ib Schmidt som den første formand. Samtidig blev Risø's arbejdsfelt udvidet. Nu skulle man ikke alene se på atomkraft, men energi bredere.

## ET NYT PROJEKT

Slutningen af 1970'erne og første halvdel af 1980'erne var præget af forsigtig omstilling. Økonomien i samfundet som sådan var ringe, og det kunne mærkes på bevillingerne til Risø. Samtidig skulle institutionen finde en balance mellem arbejdet med atomkraft og forskningen i andre energiteknologier og energirelaterede emner. I denne periode fik man dog lagt grunden til Risø's meget succesrige arbejde med vindenergi. I 1981 bliver det lidt nemmere for bestyrelsen at nedtone atomkraften, fordi Energiplan 81 for første gang lagde et forholdsvis langt sigte i energipolitikken. Man kunne regne ud, at det ikke var sandsynligt, at der ville komme atomkraft i Danmark i løbet af 1980'erne. Da man nåede 1985 var løbet kørt for kernekraften i Danmark. Folketinget vedtog et endeligt nej til atomkraftværker. På det tidspunkt arbejdede godt 10 procent af Risø's medarbejdere med reaktorer og radioaktivitet, men de fleste arbejdede med drift af reaktorerne eller bistand til myndigheder og som beredskab ved en a-kraft-ulykke i udlandet. Kun 25 årsværk – omkring tre procent af medarbejderne – arbejdede med udvikling af atomkraft.

Især fra 1981 og frem havde nye forskningsområder vundet indpas på Risø, men med Folketingets beslutning blev institutionen nu reelt frigjort fra forpligtelsen til at forberede Danmark på atomkraft. Året efter blev navnet ændret fra Forsøgsanlæg Risø til Forskningscenter Risø. Opgaven blev nu defineret som at udføre naturvidenskabelig og teknologisk forskning, energi var stadig hovedfeltet.





De kommende år var på mange måder svære for Risø. Et stigende politisk ønske om at få noget konkret ud af forskningen – helst noget der kunne sælges – banede vejen for nye måder at styre forskningen på. Resultatkontrakter, evalueringer og øget konkurrence om forskningsmidler var nogle af de værktøjer, der blev taget i brug for at gøre den danske forskningsverden mere effektiv. I en stor reorganisering af det danske forskningssystem blev Risø nu defineret som en sektorforskningsinstitution hørende under Energiministeriet. Men den nye profil snærede om den grundforskningstunge afdelingsstruktur på Risø, der ikke nødvendigvis var egnet til at gå i klinch med opgaven som leverandør af forskning og rådgivning inden for Risøs afgrænsede emnefelt energi og miljø. I 1990 blev der gennemført en større reorganisering af Risø. Gamle afdelinger blev nedlagt og nye kom til – bl.a. blev materialeforskning defineret som det tredje overordnede arbejdsfelt, og det blev slået fast, at nok skulle der være grundforskning på Risø, men den skal som alt andet arbejde på stedet være rettet mod en anvendelse.

I de samme år skete der i verden uden for Risø en række begivenheder, der skulle få stor betydning for institutionens fremtidige arbejde. Gennem 1980'erne var der en stigende bevidsthed om, hvordan menneskers forurening skadede ikke bare den nære natur, men også kunne påvirke hele planeten. Hul i ozonlaget over Antarktis og en begyndende opmærksomhed på effekten af drivhusgasser fra energiproduktion og landbrug satte så småt klodens velbefindende på den politiske dagsorden. I 1987 kom FN så med den såkaldte Brundtland-rapport, der meget sigende egentlig hed Vores Fælles Fremtid. Rapporten fremhævede behovet for bæredygtig udvikling og bekæmpelse af forurening. I 1992 blev



Risø før byggeriet startede. I midten ses gården  
Risøgård, i baggrunden halvøen i Roskilde Fjord,  
hvor de store reaktoranlæg blev anlagt.

rapporten fulgt op at den første klimakonference i Rio de Janeiro. Mange medarbejdere på Risø ser i dag disse begivenheder som afgørende for institutionen. Godt hjulpet på vej af forskellige danske regeringer, der meget tidligt lagde fokus på klimadiskussionen, fik Risø med tiden et nyt samlende projekt: energiforskning til en tid, hvor fossile brændsler skal fases ud. Gennem 1990'erne og starten af 2000-tallet er forskningen i energiteknologier og metoder til analyser, planlægning og håndtering af energisystemer blevet en mere og mere betydende del af Risøs arbejde. Forskningen i vindenergi og samarbejdet med industrien på dette felt er måske det mest synlige eksempel på denne udvikling.

### IND I UNIVERSITETERNES VERDEN

I 2005 startede så et arbejde, der har fået stor betydning for Risøs seneste udvikling. I april måned det år nedsatte regeringen Globaliseringsrådet. Statsministeren selv var formand. Opgaven for rådet var at lave en strategi for, hvordan Danmark kunne blive »et førende vækst-, viden- og iværksætter-samfund«. Året efter barslede rådet med i alt 350 initiativer. Ét af dem var en gennemgribende reorganisering af den danske forskningsverden, også kaldet et nyt Danmarkskort for forskningen. Sektorforskningsinstitutioner skulle lægges ind under universiteterne, og i de efterfølgende forhandlinger nåede man frem til, at Risø skulle fusioneres med Danmarks Tekniske Universitet i Lyngby.

Beslutningen fulgte i sporet på en diskussion, der har omgærdet Risø i mange år. Den forholdsvis tunge vægt på grundforskningen på Risø passede aldrig helt godt med statusen som sektorforskningsinstitution, og der er flere gange i historien blevet rejst diskussion om, hvorvidt Risøs kompetencer ville være til endnu mere gavn, hvis institutionen blev en del af et universitet. Efter fusionen med DTU er Risø for første gang i sin historie blevet en del af den danske universitetsverden. Kontakten til universiteterne har dog længe før fusionen været vigtig for Risø. Mange specialestuderende og ph.d'er har gennem tiden lavet deres afhandlinger på Risø, og flere Risø-forskere har været tilknyttet universiteterne som adjungerede lektorer og professorer. Men ved 50-års jubilæet er man ved at lægge sidste hånd på den første kandidatuddannelse, som Risø kan tilbyde – i bæredygtig energi.

I 2007 – i forbindelse med sammenlægningen med Danmarks Tekniske Universitet – fik Risø nyt navn. Nu hedder det Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Samtidig er aktiviteterne på Risø tilpasset, så de alle primært har sigte på enten energiteknologi eller -planlægning – bortset fra det nukleare beredskab, strålingsteknologi og medicinske anvendelser af nukleare metoder. Risø er stadig det sted i landet, hvor man har den største kompetence i effekten af radioaktiv stråling, og hvordan radioaktivt materiale spredes. Denne funktion er fastholdt gennem alle årene.



Risø set fra luften. De gamle reaktorbygninger står endnu. De er overdraget til Dansk Dekommissionering, som står for afvikling af atomanlæggene.

Ved jubilæet er man også ved at kunne se endnu et eksempel på, at forskning på Risø kan skabe industriarbejdspladser. Topsoe Fuel Cell er ved at indrette et produktionsanlæg for de SOFC-brændselsceller, som Risø har udviklet og trænet Topsoe Fuel Cell's medarbejdere i at producere. Gennem store dele af sin historie har Risø haft tæt samarbejde med industrivirksomheder, men den øgede politiske fokus på, at forskning skal give afkast i form af produkter, der kan skabe vækst og arbejdspladser, har også haft en effekt på Risø. Siden 2003 er dette arbejde blevet systematiseret og har fået større fokus med oprettelsen af Risøs Innovations Aktiviteter – RIA. På 50-årsdagen er Risø også mere internationalt funderet end nogensinde før. Ikke mindst funktionerne omkring FN's UNEP-center på Risø og stedets bidrag til FN's klimapanel har placeret Risø i nye internationale samarbejder, der må formodes at blive udbygget i de kommende år.

Man kan spørge sig selv, hvorfor Risø, der blev sat i verden for at bane vejen for atomkraft, har overlevet i snart 25 år efter, at a-kraften blev dømt ude af dansk energiproduktion. Det åbenlyse svar er, at Risø har formået at ændre sig til de nye opgaver, men det giver kun en del af forklaringen.

Flere kilder peger på, at Risøs måske største styrke har været – og er – den arbejdskultur, der er på stedet. Risø er ikke bare summen af de kompetencer, der er til stede blandt de ansatte. Det er i høj grad en organisation og arbejdsmetode, hvor man fokuserer på at arbejde i projekter og i grupper. Det giver fleksibilitet og mulighed for at imødekomme skiftende krav fra omverdenen. Eller som en kilde udtrykker det:

»Tænk, hvis vi ikke havde Risø og skulle til at bygge det op.«

*Kilder: Denne artikel bygger på interview med medarbejdere på Risø, på de andre kapitler i denne bog samt ikke mindst på "Til samfundets tarv", jubilæumsbogen for Risøs 40-års jubilæum.*

# Risø støber kuglerne til vindmølleeventyr



**PÅ DET FLADE** terræn syd for Risøs hovedindgang står en række vindmøller. De er noget af det første, man som besøgende ser, når man kommer ad vejen fra Roskilde, men man skal ikke lade sig narre. Møllerne og Prøvestationen, som de står på, er ikke længere repræsentative for vindmølleudviklingen, selv om de stadig anvendes i forskningen. Afprøvninger af nye vindmølletyper foregår i dag på Risøs testfacilitet i Høvsøre på den jyske vestkyst, og her har man allerede testet møller med en nominel effekt på over 4 MW. Så vindkraften er ikke flyttet fra Risø – tværtimod. Men i dag er det ikke små smedemestre og maskinfabrikanter, der konstruerer møller på bedste håndværksmæssige beskub,



Vindmøllerne på selve Risø ved Roskilde. Disse møller er små i forhold til de møller, der i dag produceres. Risø har opbygget en testfacilitet for vindmøller ved Høvsøre i Jylland, hvor de moderne møller på flere megawatt afprøves.



Vindkraften kom på tålt ophold på Risø i slutningen af 1970'erne, men forskningsinstitutionen viste sig på flere områder at blive en uundværlig samarbejdspartner for den spirende vindmølleindustri. I dag forsøger Risø at skabe fundamentet for, at vindkraften kan rulles ud som en af verdens førende energikilder.

men en milliardindustri med over 20.000 ansatte alene i Danmark. Og Risø udfører højt specialiseret og internationaliseret forskning i det, der kan blive en hovedsten i omstillingen til et samfund uden fossile brændsler.

På blot 30 år er vindenergi i Danmark vokset fra at være bare lidt mere end en fiks idé til et af nyere tids største danske industrieventyr, og Risø har været med hele vejen. Men spørger man medarbejderne, hvordan det hele startede, får man aldeles upompøse svar. Flere kilder peger på, at det startede med en mand, der trods sit arbejde i Risøs reaktorteknikafdeling kunne finde på at bære 'Atomkraft? Nej tak'-logoet på arbejde.

Helge Petersen hed han. Siden 1950'erne havde han været ansat i afdelingen for reaktorteknik, men han var også en entusiastisk svæveflypilot med en varm interesse for aerodynamik. Og da Tvind i 1975 begyndte at bygge verdens dengang største vindmølle, var han en af flere ingeniører, der på privat initiativ tog til Ulfborg og hjalp med designet.

### **OLIEKRISE SKABTE INTERESSE FOR VIND**

Det var ikke fordi vind ellers havde en stor stjerne på Risø i starten af 1970'erne. Et flertal i Atomenergikommissionen, der på den tid var Risøs ledende organ, mente, at Risø skulle koncentrere sig om atomenergi. Men i samfundet omkring forsøgsanlægget voksede interessen. I 1975 – efter oliekrise og en ophedet diskussion om atomkraft – udgav Akademiet for de Tekniske Videnskaber (ATV) en



rapport om mulighederne for vindenergi i Danmark. Og på det politiske plan mandede overvejelserne ud i Handelsministeriets og Elværkernes Vindkraftprogram, som bl.a. satte Risøs meteorologisektion i gang med at udføre målinger på Gedser-møllen i 1977.

I 1976 blev Atomenergikommissionen nedlagt, og Risø fik i stedet en bestyrelse, der ønskede at brede aktiviteterne ud. Vindenergi kom langsomt ind flere steder på Risø. Reaktorafdelingen, hvor Helge Petersen arbejdede, fik i 1977 direktionens opbakning til at indgå i et samarbejde med elværkerne om større vindmøller, og materialeforskningsafdelingen fik til opgave at fremstille møllevinger af kompositmaterialer til en af de såkaldte Nibe-møller. Det var to forsøgsmøller, betalt af Handelsministeriet og rejst nær den nordjyske by. Vingerne, som Risø fremstillede dels af kompositmaterialer og dels i stål, og de erfaringer, man høstede fra Nibe-møllerne, var med til at bane vejen for de vingemøller af kompositmaterialer, der i dag er altdominerende i vindmølleindustrien, fortæller Povl Brøndsted fra Afdelingen for Materialeforskning på Risø. Han var med til at fremstille vingerne i det, der dengang hed Metallurgiafdelingen.

»Vingerne blev senere skiftet ud, men det var ikke kompositmaterialerne, der var noget i vejen med. Det var den stålkonstruktion, der sad inderst i vingen, der viste tegn på, at den var ved at give efter. Det har gjort, at alle danske vingeproducenter siden har fremstillet alt i kompositmaterialer,« fortæller han.

### »INGEN FREMTID I VIND«

I 1978 åbnede så Prøvestationen for Mindre Vindmøller på Risø. Den var et resultat af, at der ude omkring i landet var ved at vokse en underskov op af små fabrikanter, smede, elektrikere eller andre, der – efterhånden også ansporet af gunstige offentlige tilskudsordninger – byggede små vindmøller. Deres ofte ret improviserede møller skulle testes og godkendes, før man kunne give tilladelse og tilskud til dem. Den opgave fik Risø.

»I starten troede vi, at vi kunne godkende tre møller på en dag, men det holdt ikke. Ofte havde vi ikke nogen tegninger at gå ud fra. Møllerne var enten konstrueret uden, eller også var fabrikantene ikke interesserede i at vise for mange af deres hemmeligheder frem, og så måtte vi jo selv op og kravle i møllen og vurdere den på stedet,« forklarer Flemming Rasmussen, der var den første ansatte på prøvestationen. Han er nu programleder i Afdelingen for Vindenergi. I dag er godkendelsen af en ny type mølle en stramt tilrettelagt certificeringsproces, der kan tage op mod et halvt år. Risø fortsatte med at certificere vindmøller frem til omkring år 2000. Nu varetages denne opgave af internationale



certificeringsfirmaer som Det Norske Veritas og Germanischer Lloyd. Risø rådgiver dog stadig certificeringsfirmaer.

I starten af 1979 udvidede prøvestationen med fire nyuddannede ingeniører. De havde selv skaffet penge til et vindmølleprojekt fra en pulje for arbejdsløse akademikere og kom derfor på »tålt ophold« på Risø, som den ene, Peter Hjuler Jensen, forklarer. I dag er også han programleder i Afdelingen for Vindenergi.

»Risø var et sted, hvor man forskede i atomkraft. Der var en stærk holdning hos nogle hernede, at der aldrig ville komme noget ud af vindenergi. Men på den anden side var det også en forskningsinstitution med den nysgerrighed, der hører med til det, og jeg synes, at vi blev mødt med åbenhed og interesse,« siger han. Flere af vindkraftentusiasterne på Risø havde nære bånd til Organisationen for Vedvarende Energi (OVE), og dér var det heller ikke altid helt let at forklare, hvorfor man dog ville arbejde på Risø – atomenergiens højborg i Danmark.

## KORTLÆGNING AF VINDRESSOURCER

I 1980 afleverede Risø i samarbejde med Danmarks Meteorologiske Institut endnu et af de redskaber, der har været afgørende for vindenergiens succes; det danske vindatlas. Atlasset var en kortlægning af vindressourcerne i Danmark, men det afgørende ved dette atlas var ikke blot en række kort, det var i lige så høj grad et redskab. Atlasset var startskuddet til udviklingen af WAsP, et beregningsprogram, der i dag er verdens suverænt førende metode til at vurdere potentialet for vindkraft. Med denne beregningsmetode kan man med ganske høj nøjagtighed afgøre, hvor meget energi en mølle vil kunne producere på en given lokalitet. Med udgangspunkt i de regionale vindforhold kan man med ret få observationer af det omgivende terræn med stor sikkerhed vurdere, hvor meget energi en mølle vil kunne producere.

»Vi afleverede det første vindatlas som en tyk videnskabelig rapport, men så fik vi idéen om at tage alle beregningerne ud og lave det, vi kaldte 'husmandsmodellen', der kunne bruges af alle. Især med de små møller er placeringen afgørende. Faktisk skal man ikke flytte en mølle særligt meget, før ydelsen kan svinge med op til 50 procent,« forklarer Erik Lundtang Petersen, som er afdelingschef i Afdelingen for Vindenergi. Husmandsudgaven af vindatlasset blev en stor succes. Med den i hånden kunne kommende mølleejere eller salgskonsulenter fra vindmøllefabrikanterne i løbet af en eftermiddag beregne, hvor meget energi en bestemt mølletype kunne producere på et givet sted. Indtil da ville det have krævet målinger i måneder eller år at udarbejde et skøn med samme grad af nøjagtighed.

I starten af firserne voksede den danske vindmølleindustri støt, men da 'det amerikanske gold-rush' satte ind i 1982-83, begyndte det at gå virkeligt stærkt. Nye støtteordninger gjorde det meget lukrativt at rejse vindmøller i USA. Så lukrativt, at der blev rejst en hel del vindmøller, der ikke fungerede ordentligt eller reelt var fup-møller uden generatorer.

»Det interessante er, at hvis man ser på, hvilke møller, der stadig kører i dag, er det de danske møller,« siger Peter Hjuler Jensen. Den store nye efterspørgsel fra USA dannede basis for en række nye vindmøllefabrikanter i flere lande. Men som alle andre guldfebre varede den kort. I 1987 blev støtteordningen taget væk, og det globale vindmøllemarked brød sammen. Sammenbruddet ramte hårdt, men mindre hårdt i Danmark end andre steder. Det efterhånden veletablerede hjemmemarked gjorde, at i hvert fald dele af den danske industri overlevede. Mange var igennem økonomiske reorganiseringer, men de overlevede, så da der i 1990 åbnede et nyt marked i Tyskland og nogle år senere i Spanien, var den danske vindindustri den eneste, der virkelig var i stand til at imødekomme behovet fra de nye købere.

### SAMSPIL SKABTE SUCCES

Siden er vindmølleindustrien vokset hastigt, og vindmøller er i dag en af de hurtigst voksende energiteknologier. Når man spørger på Risø, hvorfor vindenergien blev så stor en succes i Danmark, er der flere bud på forklaringer. Trods alt var det ikke oplagt, at et firma som Vestas, der fabrikerede gyllespredere, skulle blive verdens største producent af vindmøller, eller at Lunderskov Møbelfabrik skulle blive verdens førende producent af møllevinger under navnet LM Glasfiber. Forklaringerne kredser dog alle om, at der var en række faktorer og aktører, der spillede godt sammen.

»På Risø var vi specielle ved, at vi havde både de hårde tekniske kvalifikationer på prøvestationen og så meteorologerne, der havde overblikket over ressourcerne, samlet næsten fra starten af. I andre lande har de ting typisk været adskilt, og det har betydet, at samarbejdet ikke har været så intenst som her,« fortæller Erik Lundtang Petersen. Med hensyn til udviklingen af egnede materialer måtte man på mange måder starte helt fra bunden i Danmark. Det ser seniorforsker Aage Lystrup Scheel fra Afdelingen for Materialeforskning som stærkt medvirkende til, at man fik et teknisk forspring i forhold til udlandet:

»Da jeg blev sat på opgaven med at lave vindmøller af fiberkompositter, havde vi i Danmark ganske vist den grundlæggende viden om, hvordan man laver materialer, der er stærke og fleksible nok, men vi havde slet ingen erfaring med, hvordan man udnyttede den i praktiske konstruktioner. Det hav-



## Risøs vindatlas

21

Det danske vindatlas begyndte som en kortlægning af, i hvilke områder af landet, der var de bedste vindforhold for vindmøller. Oprindeligt skulle arbejdet alene have set på, hvor to forsøgsvindmøller kunne anbringes bedst, men arbejdet blev udvidet til et vindatlas for hele Danmark.

Ud fra de beregninger, der var brugt til vindatlasset, udviklede forskerne på Risø WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program). Det er en beregningsmetode - og senere et computerprogram - der kan bruges til at afgøre meget præcist, hvor en mølle står bedst. Det er nemlig ikke nok at kende til de generelle vindforhold for et område. Skove, bakkedrag, bygninger og en lang række andre faktorer indvirker på, hvordan og med hvilken kraft vinden blæser omkring møllen.

Med WAsP blev det muligt på få timer at få et pålideligt estimat af, hvor meget energi en mølle ville kunne producere på en given lokalitet.

WAsP opdeler terrænet omkring en planlagt mølle i felter. Data om højdeforhold og arealanvendelse i hvert af felterne giver - sammen med de overordnede data for vindforholdene i regionen - et billede af vindressourcen det pågældende sted. Efter det danske vindatlas fremstillede Risø i samarbejde med en lang række EU-lande det europæiske vindatlas, som udkom i 1989, og senere er en række andre lande fulgt med.

I dag har Afdelingen for Vindenergi produceret vindatlasser for en lang række lande, udført beregninger til utallige vindenergiprojekter på baggrund af WAsP-metodikken og ikke mindst solgt WAsP-beregningsprogrammer til mere end 100 lande verden over. Det er det suverænt mest anvendte værktøj til bestemmelse af placeringen af nye vindmøller.

*Læs mere på [www.windatlas.dk](http://www.windatlas.dk)*



de de i andre lande, hvor den kom typisk kom fra fly- eller rumfartsindustrien. Der var vægten det afgørende, ikke prisen. Så de brugte alt for megen energi – og frem for alt tid – på at bringe vægten af deres møllevinger ned. Vi var ikke nær så bange for at lave noget, der først og fremmest var praktisk. Vingerne var vanvittigt meget tungere, end de vinger vi kan lave i dag, men de holdt. Vores designfilosofi med at overdimensionere vingerne betød også, at processen var hurtig, og vi var dermed nogle af de første i Europa med et brugbart vingekoncept,« forklarer han. Povl Brøndsted supplerer:

»Vores tilgang gjorde det også nemmere for os at optimere produktionsprocesserne for møllevingerne. De andre prøvede at tilpasse en viden om, hvordan man lavede flyvinger i metal til at lave møller i kompositmaterialer. Vi kunne starte fra bunden med at designe vinger til møller i kompositmaterialer.« Men først og fremmest var der et heldigt samspil mellem forskning, industri og myndigheder. Viden, virkekrang og gode økonomiske vilkår skabte et væksthuse, hvor vindmølleindustrien kunne vokse op og overkomme børnesygdommene.

#### VOKSEDE OP SAMMEN

»Det har været en fordel, at vi og industrien 'voksede op sammen'. Vi startede som en lille 'garageudviklingsenhed', og de startede også i det små. Vi har udviklet os sammen,« siger Flemming Rasmussen. Peter Hjuler Jensen supplerer:

»Der var flere steder, hvor man prøvede at gøre det samme. Vi adskilte os ved, at vi administrere-



de en godkendelsesordning. Det tvang alle, der lavede møller til at komme i dialog med os. Selv om de – især i starten – kunne være bange for at give hemmeligheder fra sig, betød det, at vi fik et utroligt godt samspil med branchen, hvor vi hele tiden kunne opsamle erfaringer og udfordre branchen med ny viden.«

Det har dog ikke kun været fryd og gammen i samarbejdet mellem vindmølleindustrien og Risø. Her har man hele tiden skullet finde ud af at lægge indsatsen det rigtige sted mellem meget fremsynet grundforskning, som industrien måske syntes var for langhåret, og så egentligt udviklingsarbejde, som virksomhedernes egne ingeniører lige så vel kunne lave. Men den gensidige nytte af samarbejdet viste sig dog, da den nylttrådte VK-regering i 2001 skar voldsomt i støtten til vindenergiforskning. En planlagt udvidelse med 20-30 medarbejdere måtte lægges på hylden, men industrien trådte til med bestillinger på opgaver, der gjorde, at Risø kunne fastholde ekspertisen hos de medarbejdere, der var ansat.

»Det gjorde virkelig ondt, og i en periode tror jeg godt, man kunne sige, at vores opgaver havde en slagside mod bestillingsopgaver for industrien, men nu er stemningen jo vendt igen, og jeg synes, vi har et fornuftigt sammensætning af opgaver«, siger Erik Lundtang Petersen. I takt med at industrien – og dermed udviklingsafdelingerne hos de store vindmøllefabrikanter – er vokset voldsomt, er det også blevet nemmere for Risø at koncentrere sig om det fremsynede. Forskningsmidlerne kanaliseres i udstrakt grad gennem store internationale forskningsprogrammer i helt nye mølletyper, udvikling af nye materialer og produktionsmetoder. En betydelig indsats beskæftiger sig med beregninger af

vindforhold, møllernes reaktioner, energiproduktion og ikke mindst, hvordan man integrerer et enormt antal nye vindmøller i de energisystemer, der i dag er bygget op om kraftværker med noget mere forudsigelige energikilder.

I takt med at vindmølleindustrien har vokset sig stor, har Risøs rolle ændret sig. Vindmølleindustriens egne ingeniører designer møller, men Risø bistår på flere fronter. Forskning i aerodynamik bliver til nye designprogrammer for eksempelvis møllevinger. Forskning i nye materialer giver mulighed for en billigere eller mere miljørigtig produktion – nogle gange begge dele. I Afdelingen for Materialeforskning forsker man også i superledende materialer til fremtidens generatorer. Og der udvikles hele tiden nyt udstyr, der kan gøre møllerne endnu bedre.

»Vi er for eksempel ved at opbygge et instrument, man kun kunne drømme om tidligere. Med en laser måler vi turbulensen i atmosfæren omkring en mølle og får dermed et meget bedre billede af, hvilke belastninger den vil blive udsat for lige om lidt. Det kan bruges til at regulere vingerne, så de hele tiden fungerer optimalt,« forklarer Erik Lundtang Petersen.

Er ambitionerne høje, så er der fordi, udfordringerne er tilsvarende store. Fusionen med Danmarks Tekniske Universitet i 2007 har yderligere bidraget til at styrke Risøs internationale position inden for forskning i vindenergi. Det er nu muligt at foretage endnu større satsninger forskningsmæssigt. Og det er der brug for.

»Planen i Europa er, at 30 procent af elforbruget skal være dækket af vind i 2030. Omtrent halvdelen heraf skal komme fra vindmøller til havs. Den amerikanske plan er den samme. Det betyder, at man hver eneste time fra nu og til 2030 skal rejse en halvanden megawatt-mølle. Og kineserne skal sikkert sætte det dobbelte antal op. Det kræver en enorm indsats,« siger Erik Lundtang Petersen.





## En hurtigt voksende energikilde

I dag dækkes omtrent en procent af verdens produktion af elektricitet af vindenergi, men den installerede effekt stiger med knap 30 procent om året. Det betyder, at den fordobles hvert tredje år.

25

Det gør vindkraft til en af de energiteknologier, der vokser hurtigst. Kun solceller vokser en smule hurtigere, men vindenergi er en langt mere moden teknologi. Der produceres i dag omkring 50 gange mere energi fra vind end fra solceller.

Dermed står vind som en af de stærkeste kandidater til at blive en afgørende faktor i fremtidens energiproduktion. Energiforsyningen ventes at blive meget mere forskelligartet, end vi har været vant til. I det 20. århundrede stod fossile brændsler sammen med en smule atomkraft og vandkraft for næsten al elektricitetsproduktion i verden. Fremover vil elektricitet og varme komme fra et miks af vandkraft, vindenergi, biobrændsler, solenergi, atomkraft, kul, naturgas, geotermisk energi, bølgeenergi og muligvis også fusionsenergi. For blot at nævne de mest oplagte. Vi skal med andre ord til at vænne os til, at energi kan komme fra mange kilder, og vi skal lære at få de mange forskellige kilder til at spille sammen.

Udfordringen ved vindenergi består i, at produktionen svinger i takt med vejret. Derfor er det et væsentligt emne for forskningen, hvordan energisystemerne kan tilpasses en betydelig andel af vindenergi. Forskellige muligheder for lagring af vindenergi er også i spil. Eksempelvis kan man lave energien om til brint, der senere kan bruges til at producere el, når det er vindstille. Hvis elbiler bliver udbredte, kan deres batterier i princippet også fungere som lager.



## Varme celler laver strøm

**DEN GØR IKKE** meget væsen af sig i landskabet ned til fjorden. Faktisk kan det selv på kortet over Risø være svært at finde den træbarak, der under det lakoniske navn Bygning 775 er hovedkvarteret for Afdelingen for Brændselsceller og Faststofkemi på Risø.

Indeni er der heller ikke meget, der umiddelbart signalerer, at barakken er centrum for verdensførende forskning inden for brændselsceller samt kernen i en af de første større danske industrisatsninger på de meget omtalte celler, der forventes at kunne revolutionere store dele af energisektoren.

Men kaster man et blik på afdelingschef Søren Linderøths reol, får man et vink om, hvilket tanke-

En brændselscelle af SOFC-typen, som Risø udvikler. SOFC-celler har blandt andet de fordele, at de er effektive og kan bruge forskellige typer brændstoffer. Herunder: Prøver på metaller til lagring af brint. Brinten sætter sig i metallernes krystalgitter.



**Klima, forsyningssikkerhed og bedre udnyttelse af vedvarende energi er dagsordenen for Risøs arbejde med brændselsceller og brint. Som med så meget anden forskning på stedet har det rødderne plantet i kernekraften.**

sæt, der præger arbejdet i afdelingen. Tunglærde bøger om faste stoffers kemi og tommetykke værker, der beskriver de tekniske finesser ved bestemte typer brændselsceller, deler hylde med erhvervs-guruen Jack Welchs opskrift på at vinde i erhvervslivet og flere bøger om ledelse og lederskab.

Så er tonen slået an. For nok er udgangspunktet på Risø forskningen, men det er i sig selv ikke nok, forklarer Søren Linderoth: »Vores mål har aldrig været forskningen for forskningens egen skyld. Den skal ud i samfundet og gøre gavn,« siger han.

Brændselscellernes historie på Risø starter officielt i 1989 og er på mange måder en klassisk Risø-fortælling. For det første handler den om at bruge kompetencer erhvervet inden for ét forskningsfelt til at gå helt nye veje. Som mange andre af de ting, der forskes i på Risø, kan også brændselscelle-forskerne trække deres videnskabelige stamtræ tilbage til forskningen i atomkraft. For det andet er det en fortælling om målet om at gå efter de forskningsområder, hvor man kan gøre en forskel. Det første skridt mod at oprette en afdeling koncentreret om brændselsceller var et større analysearbejde, der netop skulle afdække, hvor en indsats fra Risø bedst kunne betale sig. For det tredje er det en historie om tæt samarbejde med industrien – i dette tilfælde virksomheden Haldor Topsøe A/S.

At sige at arbejdet med brændselsceller startede på Risø i 1989 er dog lidt af en tilsnigelse. Det var det år, hvor Afdelingen for Materialeforskning i samarbejde med Energistyrelsen, elværkerne, og firmaerne Innovision og Haldor Topsøe startede et større analysearbejde, der skulle afklare, om Risø burde kaste sig over forskningen i brændselsceller. Men tanken om, at Risø kunne have en rolle at spille, byggede på kompetencer, der havde været på forskningscentret længe før.



En brændselscelle virker på mange måder som et batteri. Et materiale, der kan lede elektrisk ladede partikler – ioner – er lagt mellem to elektroder. Når der tilsættes brændstof og luft, vil de kemiske reaktioner skabe en spændingsforskel mellem elektroderne, og så har man elektricitet. Princippet er uhyre enkelt, men at få det til at virke i praksis og til en fornuftig pris pr. kilowatttime er mere end almindeligt kompliceret.

### FRA REAKTOR OVER BATTERIER TIL BRÆNDELSCELLER

På Risø startede man dog langt fra på bar bund. Transport af ioner vidste man allerede en hel del om fra forskningen i materialer til kernekraft. Materialernes evne til at lede både ioner og varme er kerneviden, når man skal designe brændselselementer til reaktorer. Allerede i slutningen af 1970'erne havde man på Risø set, at den viden om iontransport, man havde samlet fra arbejdet med reaktorerne, kunne sættes i sving på et andet forskningsfelt: batterier.

»På det tidspunkt havde vi stadig store danske producenter af batterier, som blev samarbejdspartnere, så omkring 1980 startede vi en indsats omkring forskning i litium-ion-batterier,« fortæller Allan Schrøder Pedersen, programleder i Afdelingen for Materialeforskning.

Han startede på Risø i 1977 med et andet forskningsområde, der også skulle komme til at spille en stor rolle: brint. Også det forskningsfelt havde udspring i forskningen i kernekraft. Der dannes brint i reaktorer. Brinten kan optages i materialerne i reaktoren og gøre dem skrøbelige. Brint kan også være

Topsoe Fuel Cells fabrik til produktion af brændselsceller under opførelse i efteråret 2007. Fabrikken skal producere brændselsceller udviklet på Risø. Flere medarbejdere har været en periode på Risø for at lære produktionsteknikkerne.



til stede i det ubestrålede materiale, f.eks. i aluminium, og der blev derfor på Risø opbygget en stor viden om, hvordan brint påvirker forskellige materialer. På grundlag af denne forskning og i forbindelse med oliekriserne opstod en idé og et nyt forskningsfelt på stationen ved Roskilde, fortæller Allan Schrøder Pedersen. Industrivirksomheden Haldor Topsøe A/S henvendte sig nemlig på samme tid til Risø for at få hjælp til at rense brint ud af gasser til industribrug,


»Man kunne isolere brinten ved at diffundere den gennem en membran af metallet palladium, og en dag kom en kollega til at tænke over, hvor meget brint der mon egentlig kunne bindes i sådan en membran. Sådan kom vi til at arbejde med lagring af brint,« fortæller Allan Schrøder Pedersen.

Igennem 80'erne svingede interessen for og bevillingerne til de nye energiteknologier i takt med olieprisen, og med mulighederne for at bruge forskningsresultaterne sammen med danske virksomheder. I slutningen af årtiet var de store danske batterivirksomheder lukket, og olieprisen var igen lav. Brint- og batteriforskningen blev sat på standby, men den nye interesse for de globale klimaforandringer og mere miljøvenlige energiteknologier åbnede igen mulighed for at anvende ekspertiserne.

## KONCENTRERET INDSATS

Den ovenfor omtalte analyse af potentialet for Risø inden for brændselscelleforskning faldt heldigt ud. Parterne konkluderede, at Risø burde kaste sig over udviklingen af en bestemt type brændselscelle: den såkaldte SOFC-celle, der er kendetegnet ved, at den har en fast ikkeflydende elektrolyt, og at





Udstyr til måling af stoffers ledningsevne ved temperaturer på op til 1000 grader Celsius. SOFC-cellerne, som Risø arbejder med, arbejder typisk mellem 600 og 1.000 grader Celsius.

## Flere slags brændselsceller

Brændselscelle er en samlede betegnelse for en række forskellige teknologier, der har det tilfælles, at de omdanner brændstof – ofte brint – til elektricitet og varme gennem kemiske processer på overfladen af en elektrolyt. Blandt de kommercielt mest interessante typer er SOFC, som Risø arbejder med, og PEMFC. Der er afgørende forskelle i de to typers måde at fungere på og dermed deres mulige anvendelse.

SOFC-celler (Solid Oxide Fuel Cell) fungerer ved en høj temperatur, typisk mellem 600 og 1.000 grader celsius. Cellen er effektiv, fordi brændslet (som kan være naturgas, brint, biogas, ammoniak og meget andet) bliver omsat effektivt inden i cellen. Desuden betyder den høje temperatur, den arbejder ved, at spildvarmen kan udnyttes til andre formål, herunder også til yderligere produktion af el sammen med f.eks. en gasturbine. Nogle af udfordringerne ligger i at starte cellerne hurtigt nok op og sørge for, at cellerne kan tåle at blive kølet ned og varmet op mange gange.

PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell). Denne type brændselscelle opererer ved en lavere temperatur, typisk 50-80 grader celsius. Denne type celle forbrænder enten rent brint eller metanol. PEMFC ses i dag som den mest oplagte type brændselscelle til at producere elektricitet fra brint i biler. De har også en fast elektrolyt, de starter hurtigt og så leverer de en stor effekt i forhold til deres størrelse. Til gengæld er de meget sårbare over for urenheder i brændslet (brinten skal være meget ren), og det er svært at håndtere mængden af vand, der dannes på katodesiden af cellen. Denne type af brændselsceller skal bruge platin som elektrode, hvilket bl.a. gør, at det er svært at få prisen til at være attraktiv for transportsektoren.



den opererer ved en meget høj temperatur. Analysen viste, at SOFC-celler virkelig kunne blive en succesrig teknologi – den høje temperatur gjorde dem effektive, og gav mulighed for at bruge en række forskellige brændstoffer i dem – og så var de som forskningsområde betragtet stadig jomfruelige.

»Vi kunne med andre ord se, at her var et sted, hvor vi i Danmark kunne gøre en forskel, og det kunne endda gå hen og blive rigtigt stort,« fortæller Søren Linderøth.

I 1990 startede forskningen i SOFC-cellerne. Fem år senere havde forskerne på Risø konstrueret den første stak – en samling af brændselsceller, der arbejder sammen om at lave elektricitet – foruden alt udenomsarbejdet med at finde materialer, der kunne håndtere de 1.000 grader varme celler, at designe testmetoder osv. Fra 95 til 98 arbejdede man på den såkaldte andengenerationscelle. For at gøre en stak billigere blev man nødt til at skifte keramikpladerne mellem de enkelte brændselsceller ud med plader af metal. Men før det kunne ske, skulle arbejdstemperaturen ned under 850 grader uden at det måtte gå ud over effektiviteten. I 1999 kunne Risø præsentere sin første andengenerations-stak. Og nu blev industrien for alvor interesseret.

## ANDEN GENERATION ÅBNEDE FOR PENGENE

Gennem 90'erne havde der været perioder, hvor det var svært at fastholde bevillingerne til feltet, flere gange havde en lukning truet, men da andengenerationsstakken var klar, øgede Haldor Topsøe A/S indsatsen. Med penge fra firmaet i ryggen kunne de omtrent 25 ansatte i Risøs forskningsprogram for brændselsceller udvide deres aktiviteter voldsomt. I 2006 var det blevet så stort et forskningsfelt, at det sammen med faststofkemien blev udskilt i sin egen afdeling med i alt 60 medarbejdere, et antal, der ved Risøs 50-års jubilæum er vokset til 120.

Samtidig er man nået til tredje generation af SOFC-celler, og Haldor Topsøe A/S har startet dattervirksomheden Topsoe Fuel Cell A/S, der er i gang med at etablere det første danske produktionsanlæg i industriel skala for SOFC-celler. Ideen er at satse på at lave mindre anlæg, der f.eks. producerer elektricitet til lastvogne, så de ikke behøver at have motoren tændt, når de holder stille. I større skala kan den samme type anlæg erstatte de hjælpemotorer, der i dag leverer elektricitet på skibe, eller SOFC-cellerne kan bruges til små kraftvarmeanlæg i huse, der modsat tidligere tiders oliefyrr både kan levere el og varme på en gang. Kernemedarbejderne i Topsoe Fuel Cell i er de seneste år blevet uddannet i brændselscelle-produktion på Risø.

»Vi kan give dem nogle kompetencer i at producere celler, og samtidig hjælper de os, for de klarer noget af det lidt mere rutineprægede arbejde hernede. De kalder det selv »blå kittel«-arbejdet, fordi

Mikroskopundersøgelse af materialer til SOFC-brændselsceller.

Th.: SOFC-celle i nærbillede.

det er præget af, at der altså skal produceres nogle celler,« siger Søren Linderorth, der er rigtigt godt tilfreds med samarbejdet med Topsoe Fuel Cell.

»Industrien kommer med nogle andre kriterier for, hvad der er interessant at arbejde med, end vi måske selv ville have lagt vægt på. De kan spørge, hvilke krav det er vigtigst at få opfyldt, for at en teknologi kan komme på markedet. Er det effekten? Er det levetiden? Prisen? Vi kan godt selv prøve at tænke os til det, men det bliver bedre, når industrien spiller aktivt med,« siger Søren Linderorth.

Han mener dog også, at det har en betydning, at netop Haldor Topsøe A/S har en tradition for at arbejde tæt på forskerne.

»Haldor Topsøe selv har jo været formand for Risøs bestyrelse, og firmaet har altid lagt vægt på forskning, så der er en gensidig respekt, som er meget nyttig,« siger han.

Samarbejdet med Topsoe Fuel Cell er kun en del af arbejdet i afdelingen. Forskerne leder stadig efter nye områder, hvor de kan bruge den viden, de har samlet. Et af de felter, som Søren Linderorth tror på snart giver resultater, er dels rensning af røggasser, dels udviklingen af magnetisk køling, en mere miljøvenlig måde at køle eller lave varmepumper på. I begge tilfælde bygger det på viden fra bl.a. forskningen i brændselsceller.

## OLIENS AFLØSER

Og så er der brinten. For selv om SOFC-cellen ikke – som de fleste typer brændselsceller – er afhæn-



gig af brint for at virke, er brint igen blevet et vigtigt forskningsfelt for Risø. Når olie, kul og gas skal skiftes ud, fordi de øger drivhuseffekten, er der brug for et nyt materiale til at fragte energi rundt i verden. Mange tror på, at brint bliver denne nye 'energibærer'. Men hvis man skal lave brint i de størrelsesordener, der så bliver tale om, er der to ting, der er afgørende at mestre: Man skal kunne lave det billigt – helst ud fra vedvarende energi – og man skal kunne lagre det på en økonomisk og praktisk måde. Produktionen af brint arbejder de med i Linderoths afdeling. I princippet kan den proces, der skaber elektricitet i en brændselscelle, vendes om. Hvis man tilfører elektricitet, f.eks. fra en vindmølle, og vand, kan brændselscellen lave vandet om til brint og ilt.

Denne proces kaldes elektrolyse, og ved at trække på erfaringerne fra arbejdet med brændselsceller er det et andet felt, hvor Risø efter Søren Linderoths vurdering har gode muligheder for at være med i front.

»Vi har vist de hidtil bedste resultater målt på, hvor meget brint vi kan producere pr. kvadratcentimeter i elektrolysecellen,« siger han. Med disse celler kan Risø også fremstille syntesegas (en blanding af brint og kulilte) udfra vand og  $\text{CO}_2$ . Med denne syntesegas kan der så fremstilles f.eks. metanol.

»Det er helt givet, at det er på grund af afdelingens gode resultater inden for elektrolyse og SOFC, at en stor udenlandsk virksomhed har ønsket at gå i samarbejde med afdelingen inden for høj-temperatur elektrolyse,« siger Søren Linderoth.

Men en ting er at kunne lave brint. Noget andet er, at få den pakket tilpas tæt – og sikkert – til at alverdens forbrugere vil tage den flygtige og eksplosive gas til sig som brændstof i deres biler eller

som energilager i deres hus som erstatning for olietanken. Det er Allan Schrøder Pedersens gebet i Afdelingen for Materialeforskning. Da der i slutningen af 1990'erne igen kom meget fokus på energiteknologier, kom det tidligere arbejde med lagring af brint igen til ære og værdighed. Nu blev arbejdet rettet mod at lagre brint i nanostrukturerede metaller og legeringer. Metaller kan binde brint til sig, så den fylder meget lidt. Desværre er den tung, og det kan tage tid og energi at få brinten frigjort igen, men de udfordringer arbejder de nu med at løse på Risø.

»Over årene har vi haft succes med at ændre fokus flere gange, men hele tiden bygget på den viden, der var samlet. F.eks. er viden om lagring af brint i realiteten en viden om gas-metalreaktioner, der har grundlæggende betydning for en række vigtige tekniske processer og i øvrigt også er vigtig i mange områder af den nye nano-videnskab og -teknologi. Man siger ofte, at det tager 10 år at opbygge en god forskningsgruppe, men 10 minutter at bryde den ned. Derfor tror jeg, at det er den rigtige måde at arbejde på for et sted som Risø,« siger Allan Schrøder Pedersen.

Men arbejdet i fronten af feltet for energiteknologier er også risikabelt. I de senere år har der været stigende interesse for nye batteriteknologier. Så meget, at man flere steder er begyndt at tale om, at brændselsceller og brint måske får en mindre rolle i fremtidens energisystem, end mange regnede med for bare få år siden.

Samtidig skifter markedsudsigterne for Risøs SOFC-brændselsceller nærmest måned for måned. Men det er en del af spillet, når man udvikler nye teknologier, siger Søren Linderøth, der ikke er bekymret. For selv om man risikerer at satse på en teknologi, der i det lange løb ikke blev den store vinder – som tilfældet var med atomkraften i Danmark – så er arbejdet ikke spildt, mener han.

»Et sted som Risø skal turde tage de risici og gå de veje, som industrien endnu ikke tør betræde. Og så længe vi laver noget, der virker, så skal det nok finde en vej til at blive brugt,« siger Søren Linderøth.





## Brintsamfundet

35

Olie er på mange måder en fantastisk ressource. Den er nem at udvinde, der er – eller har været – rigeligt af den, den er nem at transportere, og den kan forarbejdes til en lang række produkter. Ingen af de nye energiteknologier, der er på markedet eller er under udvikling, kan konkurrere med olien på alle de egenskaber. Men ved at skabe teknologier, der hver især kan matche nogle af oliens fordele, håber forskerne at kunne skabe grundlaget for en verden uden olie.

Et vigtigt element er, at der skal udvikles en ny »energibærer«, et medium, der kan lagre energi og ikke mindst flytte den rundt. Brint er i manges øjne et godt bud på sådan et medium. Udtrykket »brintsamfundet« eller »brint-økonomien« dækker over en vision om, hvordan verden kan indrettes med brint som den primære bærer af energi.

Brint kan fremstilles af vand, hvis man tilsætter energi i form af elektricitet. Og brint kan bruges til at lave elektricitet. På den måde kan f.eks. strøm fra vindmøller laves om til brint og gemmes til en dag, hvor vinden ikke blæser. Eller biler kan bruge brint i stedet for benzin i tanken, og lade en brændselscelle levere energi til elmotorer.

Brint har som energibærer en række fordele. Den kan laves alle steder, bare man har rigeligt med elektricitet. Den er ugiftig, og den slipper aldrig op. Til gengæld er der også en række problemer. Der er et stort tab af energi, når man omdanner el til brint og tilbage til el igen. Brint er svær at transportere, og det vil kræve store investeringer at realisere et brintsamfund.

Brintsamfundet som idé får da også konkurrence. Flere mener, at f.eks. metanol vil være en mere oplagt energibærer. Eller måske batterier.






## Braendselsstave banede vej for biologien

**HISTORIEN OM BIOENERGI** og biomaterialer er et kerneeksempel på, hvordan teknologisk ekspertise på et område kan bære frugt i helt andre og overraskende sammenhænge. At lave bioethanol ud af halm eller søsalat var i hvert fald langt fra Risø-forskernes forestilling, da de i slutningen af 70'erne forsøgte at finde en proces, hvormed man kunne udvinde råstoffet til atomenergien – uran – ud af Kvanefjeldet på Grønland. Uranet i Kvanefjeld kunne blive interessant for Europas forsyningssikkerhed for energi.

Fjeldet ved Narsaq i Sydgrønland havde ganske store mængder uran alt i alt. Problemet var, at koncentrationerne var ganske små. Løsningen var at sænke det findelte materiale fra fjeldet i vand,



Halm og andre plantematerialer, der tidligere blev set som rest- eller affaldsprodukter, er ved at blive opdaget som en ressource, blandt andet takket være forskningen på Risø.



Der skulle stærke materialer til at indkapsle atomenergiens enorme kræfter, og fra Risøs viden om fiberforstærkede metaller til reaktorer er der udsprunget forskning i biologiske fibermaterialer, der i dag blandt andet har givet afkast i vindmøllevinger og en biologisk stol af tætvævet hør og biopolymerer. Også Risøs forskning i fremtidens biobrændstoffer har aner i atomkraftteknologier.

tilsætte ilt og udsætte det for stort tryk og varme i en rørreaktor, der virker som en avanceret trykkoger. Processen, kaldet vådoxidation, virkede. Det kunne frigøre uranet fra malmen. Men Risøs videre eksperimenter viste, at processen også kunne bruges til noget helt andet: Nemlig at fjerne uønskede materialer som f.eks. det giftige stof fenol, der stammer fra opløsningsmidler, fra forurenet industrijord. Det var en umiddelbar anvendelig proces, der påkaldte sig interesse fra en canadisk virksomhed. Så Risø solgte patentet til at rense jord med vådoxidation til den canadiske virksomhed. Men Risø så også andre anvendelsesområder for vådoxidationen.

»Min indgangsvinkel i 1990'erne var at prøve at bruge processen til at omdanne halm til bioethanol – altså alkohol. På det tidspunkt var det ikke en idé, som forskningsverdenen synes var særlig interessant. Mange synes, det var lidt grinagtigt og underligt og reagerede sådan: Hvad skal det nu bruges til, og kan det betale sig?,« husker seniorforsker i Afdelingen for Biosystemer Anne Belinda Thomsen.

## ANDENGENERATION ER BEDST

Halm, savsmuld, bagasse fra sukkerrør og andre planterester består mest af sukkerarter, omend ikke arter, man som forbruger normalt kalder sukker: Primært komplicerede kulhydrater som stivelse og cellulose, holdt sammen af et stof kaldet lignin, der virker som cement. Udfordringen var at 'åbne' biomassen, som kemiingeniørerne kalder det, så sukermolekylerne i f.eks. halmen bliver tilgængelig. For har



Plantefibre under bearbejdning til kompositmateriale.

man sukkermolekylerne i en tilgængelig form, er det simpelt at lave det om til alkohol. Det viste sig, at vådoxidation var en effektiv måde at få opløst planterester i sine enkeltele, som derefter kunne angribes af enzymer og fermenteres til biobrændstof. Sammen med DTU-professor Birgitte Ahring fandt Anne Belinda Thomsen måder at forbedre processens effektivitet på, og ved årtusindskiftet begyndte interessen for forskningsområdet at eksplodere rundt omkring i verden.

Det skiftede i starten af 2000, da amerikanerne begyndte at bruge majs til at fremstille bioethanol. Det kaldes førstegenerationsbiobrændstof, og brændstoffet stammer fra spiselige afgrøder. Men beregninger af  $\text{CO}_2$ -udledningen viste, at man kun sparede atmosfæren for 18 procent  $\text{CO}_2$  i forhold til benzin, når man lavede biobrændstoffer af fødevarer. Derimod kan man spare en langt større mængde  $\text{CO}_2$  ved at bruge andengenerationsbiobrændstoffer lavet af affaldsprodukter. Og den forskning havde Risø allerede begyndt i starten af 90'erne. I 2008 arbejder Risø med prototyper på et såkaldt bioraffinaderi, der gør produktionen af biobrændstof langt billigere og mere miljøvenligt. Raffinaderiet bruger i laboratorieforsøgene rapsplanten til ikke bare at producere dieselolie af rapsolien, men også bioethanol, biohydrogen, biogas, foderkager til husdyr, restproduktet lignin til brændsel og sågar plantestoffer, der kan bruges til kræftbehandling. Risø har også patent på at skabe biobenzin ud af husholdningsaffald, slam fra spildevandsproduktionen og det næringsholdige spildevand.

## BÆREDYGTIGHED

Produktionen af biobrændstoffer kan dog have store etiske problemer, hvis man bruger fødevarer eller marker, hvor der kunne have været produceret fødevarer.

»Der bliver større og større mangel på fødevarer, i og med at vi bliver flere mennesker på planeten. Når vi nu på verdensplan bruger en tredjedel af majs til at fremstille energi, så er det ved at være kritisabelt,« siger Anne Belinda Thomsen. Risøs arbejde baseres på tanken, at biobrændstof bør produceres af planterester, og samtidig at produktionen af bioenergi helst skal foregå økologisk. Et af afdelingens projekter hedder Bioconcens og har til formål at udvikle økologiske landbrug, der producerer både fødevarer og energi, heriblandt varme, elektricitet og selv brændstof til sine landbrugsmaskiner.

Forskningen i biobrændstofferne fremtid peger i disse år i forskellige retninger, nogle steder arbejder man på at manipulere planters gener, så de f.eks. får et meget højt indehold af olie eller sukker til energiproduktion. Men spørgsmålet er, om ikke naturen stadig har et par esser oppe i ærmet. Tag f.eks. alger, et nyt og voksende forskningsområde i disse år, fordi alger indeholder meget energi, vokser hurtigt (se bare danske vandløb i en varm sommer) og ikke kræver landbrugsjord. Her kommer søsa-

lat ind i billedet, en makroalge, der som navnet antyder ligner grøn salat, og som danner flager på flere meter på hvert led. Ideen om at bruge søsalaten som basis for biobrændstof stammer fra Danmarks Miljøundersøgelser, der har undersøgt algen og fundet ud af, at dens vækstrate er enorm: Starter man med en kvadratcentimeter alger, så vil de i løbet af 26 dage vokse til en kvadratmeter! Samtidig indeholder søsalaten samme store mængde kulhydrater som hvede og majs.

Forskere på Risø undersøger nu algens brugbarhed som råvare til produktion af bioethanol og biogas. Også DONG er involveret, for søsalat vokser ekstra godt, hvis det får en stor dosis  $\text{CO}_2$ . Så hvis man kunne bruge  $\text{CO}_2$  fra kulkraftværkerne til at dyrke søsalaten, ville man have noget nær det perfekte biobrændstof: En type benzin, der ikke blot i sig selv var noget nær  $\text{CO}_2$ -neutral, men som også hjalp kraftværkerne med at slippe af med store dele af deres  $\text{CO}_2$ -udledning.

## FRA STÅL TIL HAMP

Risøs forskning i de fysiske materialer, der skulle til for at bygge reaktorer og anlæggene omkring dem omfattede blandt andet forskning i aluminiumtyper, der havde gode varmeegenskaber, høj styrke og lang holdbarhed. Og man så også på, hvordan man kunne bruge fibre af forskellige art, f.eks. glasfibre, til at styrke metallerne. Det var en forskning og en indsigt, Risø skulle få god brug af, da energikrisen kom i 1970'erne, samtidig med, at befolkningens og politikernes modstand mod atomkraft steg. Nu blev vindmøller et kerneområde for Risø, og for Afdelingen for Materialeforskning var udfordringen klar: at skabe materialer til vindmøllevinger, der var lette, men kunne tåle at blive vredet, trukket og presset i enhver form for vindstyrke igennem deres 20-årige levetid. Ingen smal opgave, for analyserne viste, at en vindmøllevinge igennem sin levetid bliver bøjet et par 100 millioner gange.

Ideen var med det samme at lave vingerne ud af polyester kombineret med stærke glasfibre, et kompositmateriale, der i langt højere grad kunne modstå vridninger. Forskellige sammensætninger af plast og fibre fik testet deres egenskaber i Risøs 'maskiner til mekanisk afprøvning', maskiner der trykker og strækker et materiale i op til en million gange på et døgn. Erfaringen og dataene fra Risøs undersøgelser blev brugt af den lille, nye vindmølleindustri med Vestas og LM Glasfiber i spidsen til at skabe deres første vindmøller. Nu er både Vestas og LM Glasfiber giganter inden for vindenergien, men Risø har stadig kontrakt med dem om at afprøve deres materialekonstruktioner.

I begyndelsen af 1990'erne startede Risø sammen med Danmarks Tekniske Universitet og Den Kongelige Veterinær- og Landbohøjskole et forskningsprogram, der skulle undersøge brugen af cellosefibre – plantefibre – bundet sammen med plast.



»Samfundet var i stigende grad interesseret i, at ting blev produceret på miljørigtig vis, og hverken kulfiber- eller glasfibermaterialer kunne kaldes specielt bæredygtige,« siger forskningsspecialist Hans Lilholt. De stærke kulfibre er f.eks. fremstillet af akryl, der på sin side er fremstillet af olie. I dag er fokus i høj grad skiftet til nye materialer – ikke mindst fordi det er her, de interessante udfordringer ligger. Nye materialer er dog så meget sagt. Det er nærmere gamle, stærke materialer sat i nye rammer såsom hamp (kendt fra sejskibenes hampereb), hør fibre (kendt fra hørsække) og jute (det plantemateriale, man laver hessian af). Fibrene kommer typisk i bundter, der samles og presses i en form sammen

Naturmaterialer kan i fremtiden udgøre hovedstammen i mange af de produkter, vi i dag får fra fossile brændsler. Det kan være som biobrændstof i biler eller kompositmaterialer i f.eks. møbler.

Th. ses hampefibre, der er et af de fibermaterialer, der arbejdes med på Risø.



41

med polymerer – eller endnu bedre, miljøvenlige biopolymerer. I Afdelingen for Materialeforskning arbejder man på at gøre materialerne stærkere, stivere og mindre modtagelige for en af plantefibrenes svagheder i forhold til kul- og glasfiber: fugt.

»Vi kigger på cellulosefibre, fordi de er stærke og lette, ikke fordi de er grønne, selv om det også er godt i denne sammenhæng. Det udvider det spektrum af materialer, man har til en given anvendelse,« siger Hans Lilholt. Samarbejdet mellem forskerne i materialeforskningsafdelingen og biosystemafdelingen handler også om, hvordan restprodukter fra produktionen af bioenergi kan bruges til at lave

biomaterialer. Målet er, at i stedet for blot at få bioenergi ud af sin biomasse, bør man også kunne få biofibre til f.eks. at lave hverdagens ting. Som eksempel har Risø spinn-offvirksomheden Biobiq A/S på forsøgsbasis fremstillet tre forskellige stole, bl.a. Arne Jacobsens 7'er, af et biokompositmateriale baseret på jutfibre i en matrix af PLA-biopolymer. Det handler om, at intet fra biomassen skal gå til spilde. Og Risø har også en aktivitet, hvor rester fra produktionen af bioethanol – hemicellulose – bruges til at lave husholdningsfilm til at pakke madprodukter ind med.

### ØKOSYSTEMER OG KLIMA

En af Risøs opgaver inden for biomasse er af helt anderledes karakter end de andre: Nemlig at måle, hvor meget  $\text{CO}_2$  der optages af Danmarks skovområder i takt med, at den globale opvarmning tager til. En opgave, der kan være med til at besvare et alvorligt spørgsmål: Hvordan reagerer verdens økosystemer, når temperaturen stiger sammen med mængden af  $\text{CO}_2$  i atmosfæren? Vil skovene vokse frugtbart frem, fordi  $\text{CO}_2$  er nødvendig føde for planter? Eller vil varmen få andre processer til at virke den modsatte vej, f.eks. ved at øge frigørelsen af kulstof fra jorden? Målingerne kaldes flux-målinger, og udstyret sidder på Risøs 57 meter høje meteorologiske mast ved Sorø, hvor det 10 gange i sekundet måler, hvor meget  $\text{CO}_2$  der transporteres op og ned over skoven. Over tid danner det et billede af, om skoven optager eller afgiver  $\text{CO}_2$ . Skove burde egentlig efter gammel lærdom afgive  $\text{CO}_2$  om vinteren og optage den samme mængde om sommeren – i gennemsnit. Men Risøs målinger har vist, at Lille Bøgskov ved Sorø har optaget mere  $\text{CO}_2$ , end den har afgivet, siden målingerne begyndte for 12 år siden – i øvrigt som et af de første steder i verden. Det samme billede ses i andre europæiske lande, og det tyder på, at skovene afbøder noget af effekten af menneskets udledning af drivhusgasser. Men kun noget, for  $\text{CO}_2$ -indholdet i atmosfæren stiger stadig år for år.

»Og der er en risiko for, at balancen vender, så skovene begynder at afgive mere, end de optager,« advarer Kim Pilegaard, afdelingschef i Afdelingen for Biosystemer. Fluxmålinger ved Sorø er en del af et stort EU-projekt, Euroflux, med 60 partnere, og indgår i Fluxnet, der er finansieret af NASA i USA. I sidste ende er data fra Sorø med til at skabe modeller over verdens  $\text{CO}_2$ -udledning og dermed give indsigt i klodens klimaforandringer. Risøs styrke i denne forskning er, at man har samlet viden om en række faktorer med betydning for det samlede billede, vurderer Kim Pilegaard.

»Det unikke er, at vi har en ekspertise, der rækker helt fra det plantefysiologiske – hvor meget kulstof man kan binde i økosystemet – til forskning i effekter af klimaændringer, oplukning af biomassen, produktionen af bioethanol og vurdering af bæredygtighed,« siger Kim Pilegaard.





## Det store biobrændstof-dilemma

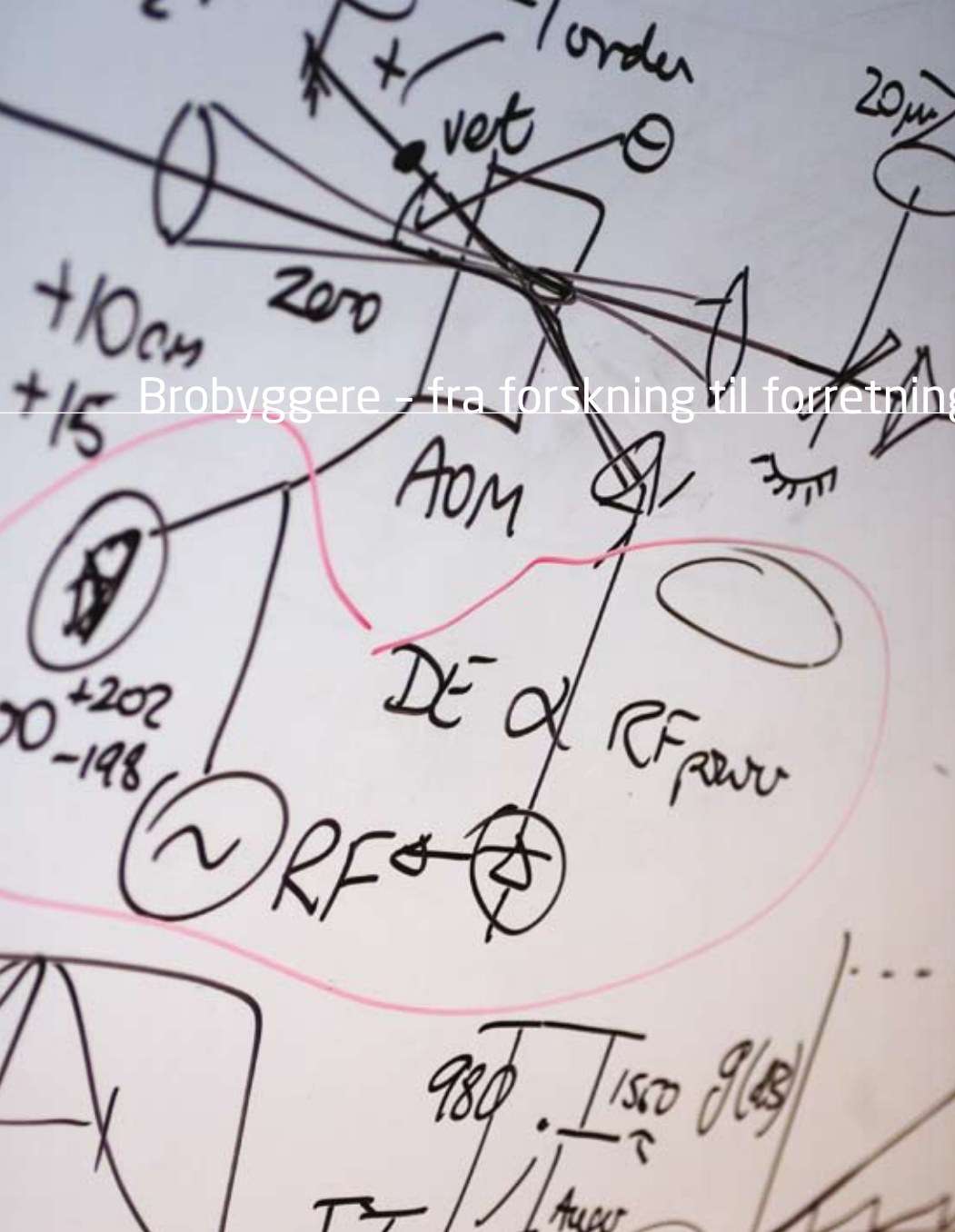
43

En æra med billig, rigelig energi er ved at være forbi. Siden forrige århundrede har vi brugt fossile brændstoffer – i virkeligheden kondenserede planterester – til at drive vores industrier og fødevareproduktion. Men inden for få årtier må man ifølge energieksperter regne med, at adgangen til billig olie slipper op – hvis det ikke allerede er sket. Flere energianalytikere regner med, at olien bliver tre gange dyrere inden 2020, og det ændrer hele fundamentet for verdensøkonomien.

Biobrændstoffer er derfor en af de centrale løsninger, som verden har bestemt sig for at eftersøge. Det er brændstoffer, der baserer sig på afgrøder eller resterne af afgrøder, og som i teorien er CO<sub>2</sub>-neutrale. Det er uden sammenligning her, de fleste ressourcer i forskningen i alternativ energi lægges, og ikke mindst lægges disse midler som landbrugsstøtte.


Men førstegenerationsbiobrændstoffer, dvs. biobrændstoffer baseret på f.eks. majs og palmeolie, anklages i øjeblikket for at være problematiske, fordi disse konkurrerer med fødevareproduktionen. Desuden viser nogle forskeres beregninger, at der rent CO<sub>2</sub>-mæssigt kun er marginale fordele at hente i forhold til olie. Det skyldes, at de enten kræver store mængder af energi til at producere eller står for store dele af verdens afskovning.

Det er et faktum, som man på Risø har været klar over i mange år, og derfor koncentrerer forskningen sig om at bruge biomasse på en miljømæssig forsvarlig måde, hvor alle elementer af råstofferne udnyttes til mange formål. Her satses på andengenerationsbioenergi, der ikke konkurrerer med fødevarer: F.eks. at bruge halm til bioethanol, biogas og biomaterialer til at lave fysiske produkter af – hvor produktionen er primært økologisk og har, hvad man kalder et fornuftigt CO<sub>2</sub>-regnskab.



## Brobyggere - fra forskning til forretning

**RIA - RISØS INNOVATIONS AKTIVITETER** - holder til i et kontor på laboratoriegangen i Bygning 108 på Risø. Ingen af de seks medarbejdere er forskere eller trænede laboratoriemedarbejdere. De har for de flestes vedkommende en kommerciel baggrund, og som en del af administrationen kunne de egentlig forventes at sidde ovre i hovedbygningen, 'førerbunkeren', eller hvad man ellers kalder Bygning 101, hvor Risø's ledelse og administration holder til. Men på laboratoriegangen kan medarbejderne på innovationsteamet få noget, som hovedbygningen ikke byder på. De kan støde ind i forskerne uformelt, uforpligtende og få en uplanlagt snak om, hvad der rører sig.



Det startede med en Roskilde Festival, der gav genlyd i forskningsverdenen, men det byggede på gamle traditioner på Risø. I de senere år er det livslange samarbejde mellem danske industrivirksomheder og Risø blevet suppleret med målrettede innovationsaktiviteter.

»Vi skal være, hvor forskerne er. Meget af den viden, de har bygget op igennem årene, ligger jo som hyldevarer i deres hoveder. Vores job er at bringe den ud i spil,« siger leder af RIA Helle Bunkenborg. Til det formål har RIA flere redskaber, fra samarbejder i vidensnetværk til koncentrerede workshops mellem forskere, erhvervsfolk, designere, projektmagere eller hvem, der nu formodes at kunne have glæde af og inspirere hinanden.

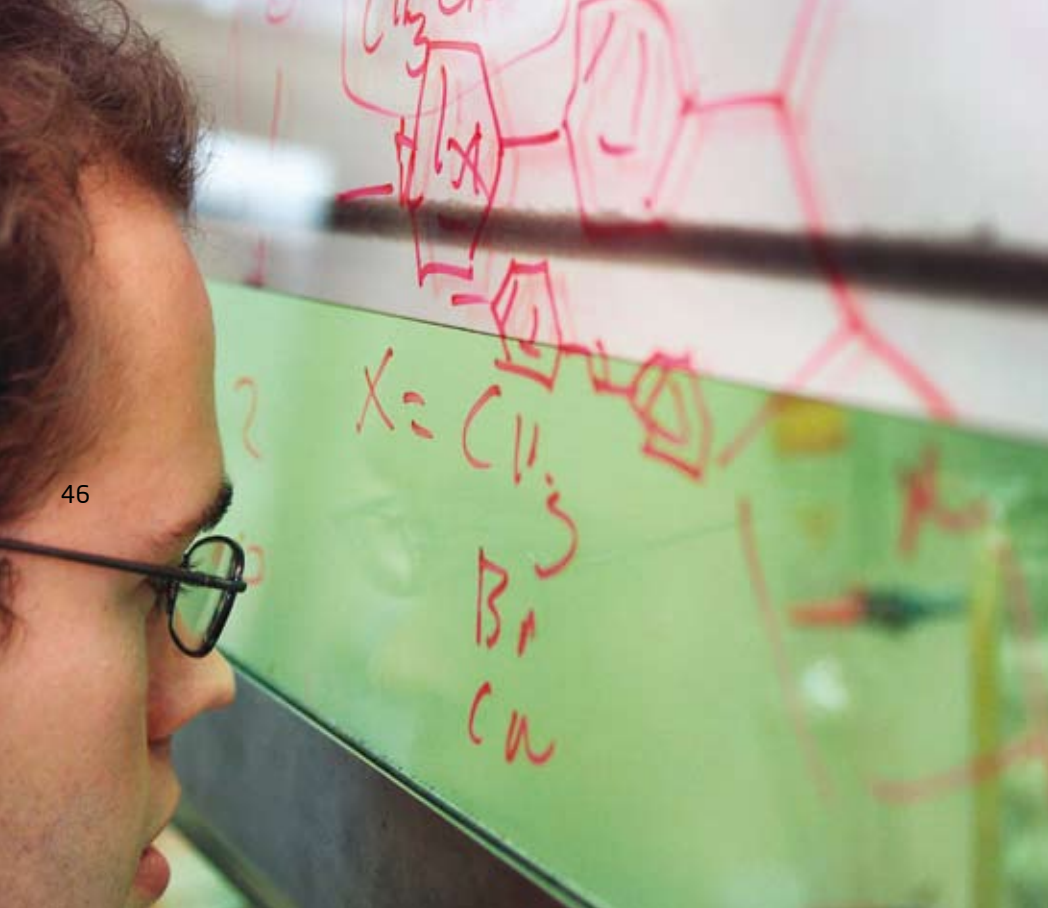
»Vi opfatter os selv som brobyggere, der skal sørge for, at der er så kort vej som muligt fra forskning til forretning,« siger Helle Bunkenborg.

»Risø har altid haft et tæt samarbejde med erhvervslivet. Man har altid bedrevet forskning med et formål. Men i 2003 besluttede direktionen at systematisere arbejdet og intensivere samarbejdet på tværs af Risø, så alle kompetencer blev bragt i spil i innovationsprocessen,« forklarer hun. Samtidig skete der det, at Musicon Valley – et vækstmiljø omkring Roskilde Festival – henvendte sig og forhørte sig, om Risø var interesseret i at være med på festivalen.

»Der var lidt murren over, om det nu var noget, vi skulle være med til, men der var en del, der gerne ville, og i løbet af tre uger fik vi stablet noget på benene, som vi faktisk var ret godt tilfredse med,« fortæller Helle Bunkenborg.

Samarbejdet mellem festivalen og forskningscentret gav genlyd. For det første har det udviklet sig i samarbejdet med Musicon Valley, hvor flere andre aktører fra Roskilde-området er med. For det andet har det givet anledning til flere interessante ideer, f.eks. vindhætter til mikrofoner, der slipper lyden





bedre igennem, trådløs signaloverførsel fra scene til højtaltartårne og flere produkter inden for belysning, særligt det energibesparende diodelys. Hvor mange af ideerne, der bliver til virkelighed er ikke til at sige, men de viser, at der kan opstå frugtbare møder, måske især de steder, hvor man ikke regnede med det. For det tredje – og ikke mindst vigtige – så blev samarbejdet mellem Risø og Roskilde Festival opdaget og rost i en leder i det ansete tidsskrift Nature under overskriften 'Science rocks'.

»Det betød, at der internt kom en stor accept af samarbejdet, og året efter stod Risøs forskere i kø for at være med,« fortæller Helle Bunkenborg.

En af dem, der greb indbydelsen fra Roskilde Festival allerede det første år, var programleder Povl Brøndsted. Han så det som en chance for at bruge sin viden i en ny sammenhæng og for at møde mennesker, der tænkte anderledes end han selv og kollegerne.

»Vi arbejder med energi på Risø, og det er klart vores hovedopgave, men jeg synes, det er fint, hvis vi kan bruge noget af vores tid på at kigge ud ad vinduet og se om ikke, vi kunne få øje på andre områder, hvor vi kan bringe vores viden i spil,« siger Povl Brøndsted. Efter hans vurdering begyndte der allerede før 2003 at ske et skift i måden, man tænkte på innovation på Risø. Han ser en afgørende udvikling omkring år 2000, hvor man på Risø begyndte at se på, hvordan de kompetencer, man havde samlet, kunne bruges inden for lægemiddel- og medico-industrien.

»Der er sket meget i de sidste 10 år. Der har været masser af innovation på Risø også før det, men det er blevet sat meget mere i system, og det ligger længere fremme i bevidstheden nu,« siger



han. Han tror, at en af forklaringerne er den øgede fokus på innovation i samfundet som sådan og de udfordringer, som globaliseringen stiller det danske samfund over for.

«Vi har alle vænnet os til at sige, at vi skal leve af innovation. Tidligere kom folk til os med problemer, som de forestillede sig, at vi kunne hjælpe med at løse. Nu ser vi også selv på vores forskning med innovationsbriller, og vi kontakter virksomheder og inviterer dem til at præsentere os for problemer, som forskerne muligvis kan løse,» siger Povl Brøndsted.


For Helle Bunkenborg har kombinationen af den holdningsændring og et stort fokus fra ledelsen skabt mulighed for at komme videre ud med Risøs viden – til gavn for Risø og til gavn for samfundet.

«Samfundet investerer en masse penge i Risø. Innovationsarbejdet er endnu en måde at give noget tilbage. Danmark kan ikke konkurrere alene på uddannelse og kompetencer. De sprøjter jo forskere og ingeniører ud i Kina og Indien. Men vi kan noget med innovation. Måske har det noget at gøre med, at vi har forholdsvis små sociale skel i Danmark. I hvert fald kan vi håndtere mødet mellem forskere og andre grupper på en meget uformel og afslappet måde, der er befordrende for, at der skabes ideer,» forklarer hun. Men hun slår også fast, at det ikke kommer af sig selv.

»RIA er et kommercielt brohoved i en naturvidenskabelig og teknisk institution. Vi sidder som sagt helt bevidst ude mellem forskerne, for vi skal kende dem, opbygge en tillid og vide, hvad de er i gang med i øjeblikket. Det er på den måde, vi bedst kan være med til at bringe deres viden i spil,» siger hun.

Videnskabsminister Helge Sander betragter SOFC-brændselsceller produceret på Risøs første prøveproduktionsanlæg.



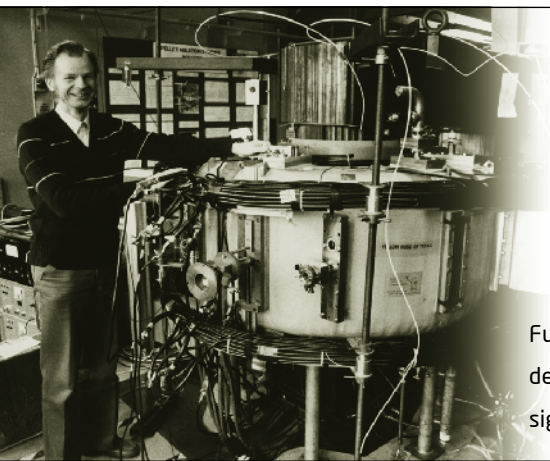


## Naturens kraftværk skal tøjles

**VI TÆNKER IKKE** over det, men de fleste af vores energiformer stammer i virkeligheden ét sted fra: solen. Olie, gas og kul, vores primære energikilder, stammer fra sammenpresset solenergi – planter, der er vokset op på solens stråler og gennem årtusinder er bundfældet og presset sammen i jordens undergrund og nu kan suges op med boreudstyr eller hentes fra miner. Bioenergi i form af bioethanol og biodiesel til biler stammer som regel fra planter. Energien fra vindmøller stammer fra, at solens energi sætter atmosfæriske vindsystemer i gang, og energien fra solceller og solvarmeanlæg stammer selvfølgelig fra solen. Ideen med fusionsenergien er fundamentalt en anden: Det er ikke energi, der stam-



Vedligeholdelsesarbejde i Joint European Torus, verdens foreløbigt største forsøgsanlæg for fusionsenergi – kaldet en tokamak. I den doughnut-formede ring skabes mange millioner grader varmt plasma, hvor atomkerner smelter sammen og frigør store mængder energi. Nedenunder ses Risøs egen tokamak, DANTE, der var i funktion fra 1977 til 1986.



**Fusionsenergi – selve Solens kraftkilde – rummer enorme muligheder, men den er svær at udnytte. Risø har arbejdet med fusion i årevis. Det lønner sig nu, hvor den internationale forskningsindsats intensiveres.**

mer fra solen. Det er energi, der er solen. Det er et forsøg på at genskabe de enorme og voldsomme processer, der foregår i stjernerne, og som har æren for, at jordkloden hver time rammes af mere sol-energi, end menneskeheden forbruger på et år.

Fusionsenergien virker ved at sammensmelte – fusionere – lette elementer til nye elementer, der er tungere og ligger højere i grundstoffernes rangorden. Det er i denne skabelsesproces, at der udløses store mængder af energi. Det interessante ved fusionsteknologien er, at brændstoffet til reaktorerne – to varianter af brint – i praksis aldrig slipper op. De miljømæssige problemer er ubetydelige. Teknologien er sikker.

»Fusionsenergi er en udtømmelig energikilde, og fusionsreaktorerne kan fungere glimrende som såkaldt baseload – altså kraftværker, der konstant leverer basen af vores strømforbrug, sådan som kulkraftværker og atomkraftværker gør i dag. Potentialet er simpelthen enormt, og der er ingen regionale begrænsninger af råstoffer,« siger Henrik Bindslev, der er konstitueret direktør for Risø og tidligere ledte Risøs forskning i plasmafysik og -teknologi.

Men der er lang vej igen. Det har nemlig vist sig at være langt sværere at få solens kraftværk til at virke på jorden, end man oprindeligt havde forestillet sig. Alene forsøgssopstillinger er meget omfattende og dyre: F.eks. er den hidtil mest ambitiøse fusionsreaktor JET (Joint European Torus) i England, med et indre såkaldt plasmakammer, hvor plasmaet af iturevne grundstoffer har en temperatur på 200 millioner grader – 20 gange varmere end solen! Plasmaet holdes på plads af meget stærke magnetfelter – der i et kraftværk vil blive skabt af superledere.

Den næste store forsøgsreaktor, ITER, bliver dobbelt så stor og vil koste 35 milliarder kroner at bygge. Først i 2050 regner man med, at den første kommercielle reaktor vil stå færdig.

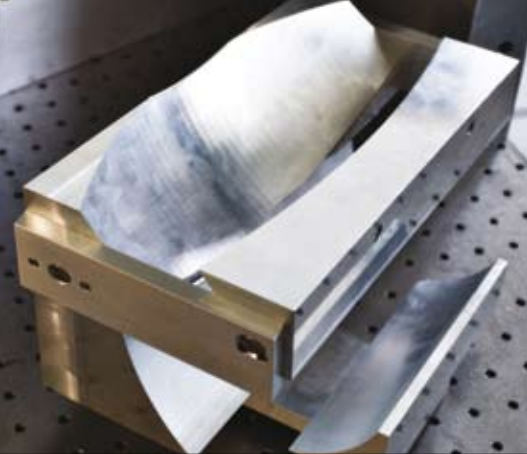
Det er med andre ord en ekstremt krævende og langsigtet forskningsindsats med en stor grad af internationalt samarbejde, og her er Risø en lille, men anerkendt medspiller. Risøs forskere i plasmafysik og -teknologi har faktisk bidraget væsentligt til flere gennembrud i forståelsen af, hvad der sker i de komplicerede fusionsprocesser.

### DANSK FORSKNING I VERDENSKLASSE

Da forskningen i fusionsenergi begyndte i starten af 1950'erne, mente man, at fusionsprocesserne var relativt simple, og at man nok snart skulle få en fusionsreaktor op at køre. Men det viste sig efterhånden, at det millioner grader varme plasma i reaktorkammeret opførte sig helt anderledes og mere uforudsigeligt, end man havde troet. Plasma er betegnelsen for den sky af positive og negative partikler, der dannes i reaktoren, og observationer viste, at plasmaet dannede nærmest kaotiske vejrsystemer med vinde, turbulens og pludselige udbrud i kanten af plasmaet, der mindede om udbrud fra solens overflade.

»Der var ingen kontakt mellem de eksperimentelle målinger, man lavede, og de modeller, man havde til at forudsige, hvad der ville ske i fusionsprocessen,« siger Bindslev. Det var her, Risø for alvor begyndte at gøre sig international bemærket på fusionsområdet. Risø byggede sit eget lille fusionskammer, en såkaldt tokamak, i 1970'erne, og lavede flere andre eksperimentelle opstillinger. Det arbejde gav forskningsinstitutionen en stor indsigt blandt andet i, hvordan man måler forhold som temperatur inden i plasmaet. En indsigt, der betød, at det blev Risø, der byggede store dele af det avancerede lasersystem til at måle temperaturen i JET-reaktoren i England. I slutningen af 1980'erne begyndte interessen internationalt at dale for fusionsforskning – og energiforskning i det hele taget – efter at verden var kommet sig oven på 1970'ernes energikriser.

I 2001 blev interessen for fusionsenergi igen større på Risø. Risø er i dag i verdensklasse, hvad angår teorierne omkring turbulens – altså det forhold, at plasmaet opfører sig nærmest så kaotisk som vejret. Her blev aktiviteterne udvidet igen og stærkere integreret med internationale eksperimentelle aktiviteter, ikke mindst JET. Samtidig overtog Risø erfaringer fra JET omkring måling af hurtige ioner i fusionsplasmaer og indledte et frugtbart samarbejde med Massachusetts Institute of Technology (MIT) på det felt. I dag leder Risø udvikling og anvendelse af en af de mest lovende eksperimentelle metoder til at måle, hvordan de mest energirige ioner i fusionsplasmaet, f.eks. dem, der produceres i



Spejllantenne til fusionsreaktorer udviklet på Risø. Den er en del af det måleudstyr, som Risø har udviklet med henblik på at kunne levere til ITER – en ny stor forsøgsreaktor, der skal stå færdig i 2017.

selve fusionsprocessen, opfører sig. Også materialeforskningsafdelingen på Risø kunnet levere afgørende resultater. Bl.a. var afdelingen med til at definere, hvilket materiale der skal bruges i den næste store forsøgsreaktor, ITER, der bliver bygget i Frankrig og efter planen skal stå færdig i 2016.

Men udfordringen for den forsøgsreaktor, DEMO, der følger efter i 2033, er langt større: I et egentligt fusionskraftværk med 200 millioner grader varmt, radioaktivt plasma bliver selve reaktorkammeret bestrålet konstant. Faktisk i sådan en grad, at hvert eneste metalatom i DEMO-fusionskammeret vil blive fysisk slået ud af plads 100 gange i løbet af sin levetid. Udfordringen er her at finde legeringer, der kan holde til det – noget der kræver detaljerede undersøgelser af ændringer i materialers indre struktur og deres mekaniske egenskaber. Dette forskningsarbejde følges op af fysisk-mekaniske modeller, der bruges af de konstruktører, der har ansvaret for udviklingen af fusionsreaktorer.

Forskningen fører også til udvikling af nye, metalliske legeringer og keramiske materialer, der kan holde til den store belastning under brug. Risø har i mange år været helt i front i arbejdet med at undersøge materialernes struktur og egenskaber, samt med at få resultaterne omsat i modeller. Som noget nyt har Risø udviklet en 3D-røntgenteknologi, kaldet 3D X-ray diffraction eller blot 3DXRD, der kan 'se', hvad der sker inden i et materiale, når det udsættes for tryk, træk, varme og bestråling. Risø samarbejder her med et af verdens største røntgencentre, Den Europæiske Synkrotron i Grenoble, Frankrig. Her har Risø etableret et 3D-mikroskop, der kan se, hvad der sker inden i materialernes mikrounivers i levende video.

»Det er en vigtig ny karakteriseringsteknik, som vi er i front med – det er trods alt os, der har opfundet den – og som blandt andet skal bruges til at undersøge materialer, der skal kunne holde til at være i en fusionsreaktor. Men når vores gruppe bliver udfordret til at studere materialer til fusion, så finder og udvikler vi også materialer, der kan bruges i andre sammenhænge,« siger Dorte Juul Jensen, som er chef for Risøs materialeforskningsafdeling.

## FORSKNING GIVER INDSIGT

»Kan bruges i andre sammenhænge«. Det er i virkeligheden et af kodeordene i Risøs fusionsenergiforskning. For der går langt tid – formentlig 40 år – før verden kan trykke på startknappen på sin første, kommercielle fusionsreaktor. Men for Risø handler det lige så meget om at få indsigt i nogle af de mest krævende teknologier og noget af den udfordrende teoretiske forskning. Et materiale, der kan modstå kræfterne i en fusionsreaktor, kan givetvis også bruges i f.eks. høj-effektive kedler i fremtidens kulkraftværker eller i bedre elektriske ledninger. Forskningen i superledere kan lige så vel bruges

Tv.: JET-tokamakken (se billedtekst s. 49)

under forsøg.

Th.: nærbillede af Solens overflade. Solen får  
også sin energi fra fusionsprocesser.

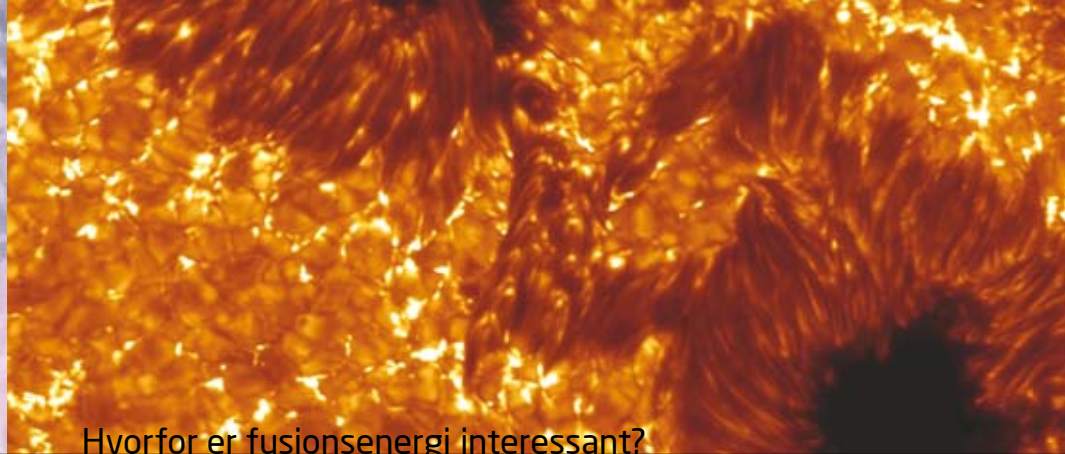
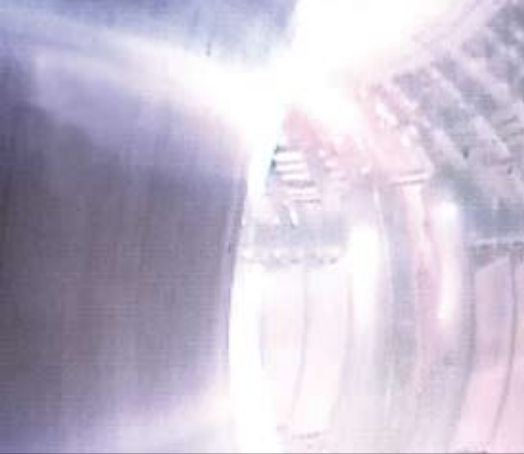
til at transportere strøm uden tab fra fremtidens megasolcelle-parker i Sahara til Danmark.

»I dag har vi et meget mere komplekst rationale for forskning, erhvervspolitik og videnspolitik, end vi havde tidligere. Ved at deltage i de store internationale forskningsprojekter får vi adgang til et vidensnetværk, som vi ikke ville have adgang til ellers,« siger Henrik Bindslev.

»Den samme teknologi ender jo mange steder, og hvis man som vi er gode til højtemperatur-superledere, så er det godt at deltage i alle de områder, hvor der er efterspørgsel på den teknologi. Med den næste store fusionsreaktor, ITER, er der en ordre på superledere, der beløber sig til 10 milliarder kroner! Når vi deltager i f.eks. den internationale fusionsforskning, så får vi et indblik i, hvor der er en udfordring, som ikke allerede er udfyldt af andre parter, og hvordan vi kan matche den mulighed med den kompetence, der eksisterer i det danske,« siger Henrik Bindslev. Samtidig slår han fast, at man ikke politisk kun kan planlægge forskningen efter, hvor der netop nu er tydelige erhvervsmuligheder. Man skal også have den langsigtede grundforskning med, så man står med en dansk spidskompetence, når de kommercielle muligheder pludselig opstår. Forskning er ofte et lotto, hvor du kan være heldig netop at have kompetencerne til fremtidens erhvervsudfordringer.

»Med fusionsforskningen har vi købt tre lottobilletter. Den første lottobillet er, om fusionsenergien bliver til noget. Så bliver det en af verdens største industrier, og så ville det være brandærgeligt, hvis Danmark ikke var med. Den anden lottobillet er, at masser af de teknologier, der er nødvendige for fusion, allerede har erhvervsrelevans nu eller får det meget snart,« siger Henrik Bindslev.

»Og den tredje lottobillet er, at hvis du deltager i en meget avanceret international forskning, så er der en stor chance for, at du lærer noget«.



## Hvorfor er fusionsenergi interessant?

53

Behovet for billig, rigelig energi eksploderer i disse år. Ifølge det Internationale Energiagenturs World Energy Outlook 2007 vil verden forbruge 50 procent mere energi i 2030. Og hvad værre er, brugen af den mest forurenende energiform, kul, stiger hurtigst. Samtidig bliver truslen fra den globale opvarmning mere og mere påtrængende. Derfor er det essentielt at finde energityper, der kan tilfredsstille verdens energibehov effektivt, billigt og miljømæssigt forsvarligt.

Fusionsenergi har i et halv århundrede været et af de store håb for verdens energiforsyning, fordi det er en energitype, der har de samme fordele som kul, olie, gas og atomkraft: Store mængder energi på alle tider af døgnet, uafhængig af udsvingene i vind, sol og nedbør. Men uden de fossile brændstoffers forurening af nærmiljøet og potentielt uhyggelige konsekvenser for klimaet – og uden atomkraftens iboende risiko.

En anden interessant egenskab ved fusionsteknologien er, at brændstoffet til reaktorerne, modsat f.eks. atomkraftens uran eller kulkraftværkerne kul, i praksis aldrig løber ud. Brændstoffet er to tunge varianter af brint – deuterium og tritium – der er nemme at producere overalt i verden. Deuterium findes i almindelig vand og tritium dannes fra litium, et metal, der findes overalt i jordskorpen.

Samtidig er de miljømæssige problemer ved fusionsenergien ubetydelige. Fusionsenergien udleder ikke  $\text{CO}_2$  under produktionen af strøm, forurener hverken luft eller vand og kan modsat atomenergien ikke løbe løbsk. Et udtjent fusionskraftværk vil godt nok efterlade sig radioaktivt materiale, men radioaktiviteten henfalder relativt hurtigt, og efter 50 år kan stort set al materiale faktisk genanvendes.

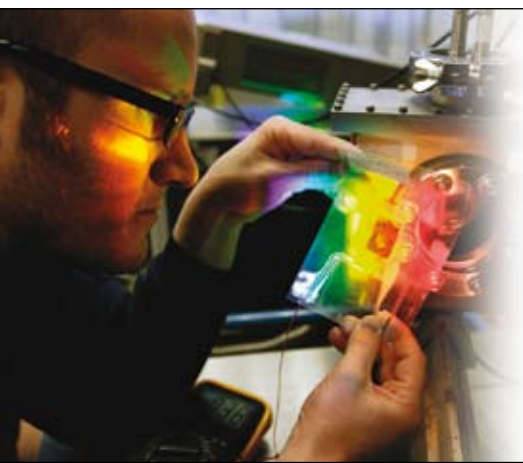


## Plast har bragt Solen til Risø

**DER FALDER STADIG** syrlige bemærkninger til seniorforsker Frederik Krebs: »Jeg har hørt rigtig meget om, at solen jo stort set aldrig skinner i Danmark, og at den bedste måde at få energi ud af plastsolceller er at brænde dem. Men jeg er ikke nærtagende. Og efterhånden kommer bemærkningerne vist mest for sjov, for vores resultater taler jo for sig selv,« siger han.

Det var Frederik Krebs' idé om at udvikle en hel ny type plastsolceller, der har ført til, at Risø ved 50-års jubilæet beskæftiger 15-17 medarbejdere på området. Forskningen har også ført til priser, samarbejde med erhvervslivet og internationalt teamwork – på et felt, der få år tidligere kom til Risø.





Det lå ikke lige i kortene, at Risø skulle forske i solceller – Solen skinner jo aldrig i Danmark. Men i år 2000 opstod en idé på Risø. Solceller af plastik kan gøre solenergien konkurrencedygtig med andre energiformer.

Da danskerne i 1970'erne og begyndelsen 1980'erne gik i demonstrationer mod atomkraft og råbte: 'Hvad skal væk? Barsebäck. Hvad skal ind? Sol og vind', rystede man på hovedet mange steder, også ude på forskningscenteret ved Roskilde Fjord. Især over det med solen, for den skinnede jo stort set aldrig i Danmark. Og da Risø skulle redefinere sig selv efter Folketingets endegyldige nej til atomkraft i 1985, var det ikke solceller, der lå lige for som det nye forskningsfelt, man nu skulle udvikle, men vindmøller. Det havde man allerede flere års erfaring med på Risø, teknologien så mere lovende ud, og nå ja, så skinner solen jo stort set aldrig i det vindblæste Danmark.

Derfor var der da også lidt intern skepsis, da kemiker Frederik Krebs i 2000 på opfordring fra sin daværende afdelingschef for fysik og kemi, Klaus Bechgaard, skrev en ansøgning til Statens Teknisk-Videnskabelige Forskningsråd om støtte til et talentprojekt om solceller. Ikke at man slet ikke havde set på solenergi før. Men det var i forbindelse med UNEP Risø Centres støtte til bæredygtig energi i udviklingslandene – ikke som selvstændigt forskningsområde.

»Det har jo været karakteristisk for Risø, at det først har været, når vi har været klar til at levere en rigtig god, nærmest unik forskningsindsats på et område, at vi er startet op,« fortæller Peter Sommer-Larsen, leder af programmet for polymerer til energiteknologi, som solcelleforskningen hører under.

»Hvis man ville forske i en type solenergi, der i forvejen er forsket rigtig meget i, er sandsynligheden for at løfte det ud til noget, der giver værdi for danske samfund, meget lille. Derfor kom solenergi først på dagsordenen herude, da Frederik kom med den gode idé,« fortæller Sommer-Larsen.



Ideen var at skabe en helt ny type plastsolceller, der kombinerede lav pris og høj effektivitet. Ideen var som sådan ikke ny: Forskere havde længe ledt efter en måde at få gang i markedet for solenergi på, der ikke har udviklet sig ret meget, siden man i 1954 for første gang lavede strøm ved hjælp af solceller af silicium, såkaldt førstegenerationssolceller. Det var dem, der så småt begyndte at dukke frem på hjemlige hustage i 1970'erne. Men netop kun så småt, for de var – og er – meget dyre. Andengenerationssolceller var tynd-films-solceller, lavet af amorf-silicium, den type, man typisk ser på havelamper. De var lidt billigere, men stadig uforholdsmæssigt dyre i forhold til den mængde strøm, de producerede. Og solenergi forblev et nicheprodukt.

Derfor var der store forventninger til, at solen endelig kunne komme ud af vindens skygge, da de første celler af plast blev udviklet i begyndelsen af 1990'erne. Den store revolution i denne tredje generation lå i prisen: Mens en kvadratmeter silicium-solceller koster mellem 1.000 og 5.000 kroner, vil samme mængde solceller af plast kunne laves for under 10 kroner. Problemet var, at plast-solcellernes ydelse ikke var særlig god, og at de kun holdt et par dage. Silicium-solcellerne kunne derimod holde op mod 25 år. Det var en af grundene til, at solcelleforskningen på Risø ikke begyndte med en række inspirationsbesøg i andre laboratorier.

»Hvis du studerer andres metoder, risikerer du at overtage andres tanker – og dermed begå samme fejl. Du skal selvfølgelig ikke begynde helt fra bunden, for så er der for meget dobbeltarbejde, men hvis man går sine egne veje, er det mere sandsynligt, at der kommer nye bidrag til forskningen,« forklarer Frederik Krebs.

Strategien virkede. I juli 2005 præsenterede forskerholdet patentet på en helt ny solcelletype af plastik for danske og internationale medier. Og året efter fik Frederik Krebs den prestigefyldte Knud Lind Larsen Pris af Akademiet for de Tekniske Videnskaber, ATV.

### PLASTCELLER BLEV TESTET I ØRKENEN

Plastiksolceller består af et aktivt plastiklag imellem to elektroder, en gennemsigtig og en spejlblank af aluminium. De sidder på hver sin side af det tynde stykke plastik. Produktionen foregår i to processer. Først bliver den gennemsigtige elektrode nærmest malet på – lidt ligesom når man laver silketryk. Og så bliver aluminiumselektroden dampet på. Tidligere blev cellen også indkapslet for at beskytte den mod ilten og vanddampene i luften, men i 2007 udviklede Risø-forskerne en type, der er luftstabil. Risøs solcelleteam arbejder hele tiden med at gøre fremstillingsprocessen mere effektiv, men det primære fokus i de første år var at forlænge cellens levetid. De eksperimenterede med holdbarhed og

Polymermaterialerne i Risøs solceller kan ikke tåle ilt. Derfor arbejdes der med dem i lukkede handskebokse.  
Th.: De færdige solceller.

gennemtestede de mest lovende eksemplarer. Det skete f.eks. ude i den israelske ørken med hjælp fra en af deres internationale samarbejdspartnere, Ben-Gurion Universitetet i Negev. Eller ved at lade solcellerne blive udsat for sne, og hvad vind og vejr ellers havde at byde på ved Risø. Eller ved blot at lade dem ligge under en kraftig lampe i et af laboratorierne – døgnet rundt, hele ugen igennem.

Da en solcelle havde ligget der i næsten halvandet år – og stadig virkede – kunne man konkludere, at den ville holde fem-10 år under helt naturlige forhold med nætter og overskyede dage. Man var med andre ord kommet ret langt siden dengang, cellerne kun holdt et par dage. Næste udfordring er at forbedre effektiviteten: Hvor en silicium-solcelle omdanner op mod 20 procent af solens lys til strøm, får Krebs og hans team kun lige under en procent ud af deres luftstabile plastsolceller. Samtidig skulle man gerne nærme sig en løsning på solcellernes hovedproblem: at de ikke som det menneskelige øje evner at tage højde for, at lysstyrken ude i dagslys varierer helt ekstremt: Der er op til 40 gange mere lys på en god sommerdag end en grå vinterdag.

### MAJS KAN GØRE SOLCELLER MILJØRIGTIGE

Forskerne arbejder også på at udvikle mindre miljøbelastende materialer – »så man lever op til sit ansvar og ikke sviner mere, end man gavner,« som Frederik Krebs udtrykker det. Selve solcellen er så lille, at den ikke er det store miljømæssige problem – det er det plastsustrat, der bærer cellen, som er problematisk. Traditionel plastik nedbrydes meget langsomt og kan ligge i hundreder eller tusinder af år i naturen. Derfor eksperimenterer man på Risø blandt andet med polymælkesyre for at skabe et plastmateriale, der langt hurtigere kan nedbrydes, og som er komposterbart: Det vil sige, at det rådner som mad, når det udsættes for 65 grader i et kommunalt biomasseanlæg. Polymælkesyre laves af majs, og er ikke nævneværdigt dyrere i materialer – udfordringen er at lave en legering, der er lige så stærk, brugbar og billig som det traditionelle plast, så solcellen kan blive helt biologisk nedbrydelig.

Plastcellernes miljøvenlighed er blot en af de ting, Risøs solcelleforskere håber at forbedre. Holdet har fået i alt 25 millioner kroner til et stort videreudviklingsprojekt. Ambitionen er at forbedre processen, stabiliteten og ydeevnen, så plastsolcellerne udvikles til et stade, hvor industrien kan få glæde af dem. Cellerne vil i starten kunne bruges i lommeregner, æggeure og elektroniske display-prisskilte i butikker, som i dag drives af små batterier eller af celler baseret på det langt dyrere amorf-silicium.

På længere sigt er det ambitionen, at teknologien skal bruges i egentlig energiproduktion.

»Jeg håber, det vil ske inden for min levetid,« siger 38-årige Frederik Krebs.

Det er bestemt også realistisk, mener Peter Sommer-Larsen. Han peger på, at Greenpeace og den

Solceller, der endnu ikke er monteret i paneler.  
Risøs solceller er billige, nu skal de blive mere  
effektive, før de er konkurrencedygtige med  
andre solcelleteknologier.

europæiske solcelleindustri European Photovoltaic Industry Association vurderer, at solceller vil blive så billige og effektive, at de vil dække cirka tre procent af det globale behov for elektricitet i 2025 – og produktionen af solkraft vil beskæftige mere end tre millioner mennesker. Også knap så involverede folk tror på teknologien: En hvidbog fra EU opstillede i begyndelsen af årtusindet et mål om, at man i 2010 ville få en procent af Europas elforbrug fra solceller. Det mål blev allerede nået i 2007, ikke mindst takket være den store tyske satsning på energiformen. Tyskerne er sammen med Japan verdens største producenter af solceller: Landet har et egentligt distributionssystem og har subsidieret energien kraftigt. Kapaciteten er på mere end 30 peak watt per indbygger – mod 0,5 peak watt per indbygger i Danmark.

### SOLCELLEHATTE PÅ ROSKILDE FESTIVAL

Risø-forskerne er dog ikke i tvivl om, at den meget fokus på klimaforandringerne og nødvendigheden af at nedbringe CO<sub>2</sub>-udslippet også vil være med til at få mere gang i investeringerne i solceller andre steder i verden, heriblandt Danmark. Især når den nye plastteknologi med videreudvikling formentlig kan fungere langt billigere og næsten lige så godt som de første- og andengenerationssolceller, der på tidspunktet for Risøs jubilæum tilsammen står for stort set hele verdensmarkedet. Risøs solcelleeksperter kan med andre ord medvirke til, at dansk solenergi meget hurtigt vil kunne konkurrere med Tyskland og Japan, selv om de lande har været klart hurtigere ude at starthullerne på dette felt. Målet for forskningen er klart, at teknologien så hurtigt som muligt skal kunne klare sig på noget, der ligner markedsvilkår. Det er netop det, det store videreudviklingsprojekt har som hovedformål. De 25 millioner kroner i projektet kommer dels fra Det Strategiske Forskningsråd, deks fra Risøs egen kasse og så fra samarbejde med tre virksomheder: EnergiMidt, plastkoncernen SP Group A/S og Støvring-trykkeselskabet Mekoprint.

Mekoprint var også med som trykker, da man besluttede, hvordan solcellen fra Risø for første gang skal afprøves i offentligheden på Roskilde Festival i sommeren 2008. Uddeling af et par tusinde hatte til festivalgæster skal vise, hvordan man kan høre radio, drevet af plastsolceller – begge dele kan indbygges i en hat. Solcelleeksperternes største frygt ved planlægningen af dette marketingprojekt er, at festivalen skal leve op til sit regnvejsry. For så vil Frederik Krebs og de andre forskere nok igen høre den der med, at solen jo stort set aldrig skinner i Danmark.



## Det vidste du ikke om solenergi

59

- Solceller producerer i dag cirka 5,8 gigawatt på verdensplan (55 procent produceres i Japan, 35 i Europa og 10 i USA). Det svarer omtrent til Danmarks samlede strømforbrug. Sol har i et par år været den hurtigst voksende vedvarende energikilde, men står stadig for blot fire promille af den globale energiforsyning.
- Førstegenerationssolceller – af silicium – har cirka 90 procent af verdensmarkedet. Andengenerationstyndfilmsolceller har det resterende. Der produceres ikke tredjengenerationssolceller af plast til det kommercielle marked endnu.
- Et 1-kW-anlæg kostede i 1995 7.000 dollar. I år 2000 var prisen faldet til det halve, men så stagnerede den nogle år på grund af mangel på udbud. Prisen falder i skrivende stund igen, og man regner med en pris på 1.000 dollar i 2015-2020. Så vil anlægget kunne tjene sig ind økonomisk på blot 10 år. Også i miljøregnskabet bliver solenergien mere effektiv – der skal færre ressourcer og CO<sub>2</sub>-udslip til at producere den.
- Outputtet af solceller måles i peak watt, Wp. Et optimalt placeret 1.000-kWp-solanlæg genererer gennemsnitligt 850 kWh per år i Danmark og 1.800 kWh per år i Sydeuropa.
- Hvis du tog seks områder i de mest solrige dele af verden, f.eks. USA, Afrika, Mellemøsten og Australien, og udlagde solceller i et areal på 100 x 100 km<sup>2</sup> hvert sted, kunne du forsyne hele verdens befolkning med energi.
- Der er ikke noget land i verden, hvor der ikke falder mere solenergi på vejnettet, end nationen forbruger af energi generelt.
- Hvis du ville forsyne Danmark med strøm fra en vedvarende energikilde, skulle du dække Langeland med solceller, dække Fyn med vindmøller, eller dække hele landet med bioafgrøder.

*Kilder: EPIA (European Photovoltaic Industry Association), Risø Energy Report 6, Peter Sommer-Larsen.*





## Strålingsforskning kan redde menneskeliv

**DEN FORMIDDAG, MANDAG** den 28. april 1986, så målingerne anderledes ud, end de plejede. Risøs helsefysikere målte rutinemæssigt indholdet af radioaktivitet i prøver fra forskningscentrets lokal-område, og denne morgen vakte resultaterne bekymring. Prøverne af græs og luft var forurenede af radioaktivitet, og indholdet var højere end de niveauer, som forskerne var vant til at se. En hurtig undersøgelse viste, at radioaktiviteten ikke stammede fra Risø selv, og efter et par opkald til kolleger i Sverige og Finland stod det klart, at heller ikke de havde en forklaring. Først om aftenen blev mysteriet løst, da de sovjetiske myndigheder fortalte, at der mere end to døgn tidligere, natten mellem

Risø har udviklet nye måder til at sikre, at patienter får den helt korrekte dosis strålebehandling. En krystal af aluminiumoxid føres ind i patienten, hvor det optager en lille del af strålingen. Ved at belyse krystallen kan man aflæse hvor stor en dosis stråling, der er modtaget.



Risøs forskning i udvikling af atomkraft var fra starten et parløb med forskningen i, hvordan radioaktivitet spreder sig og påvirker omgivelserne. I dag er atomkraften væk på Risø, men strålingsforskningen er stadig et vigtigt forskningsfelt.

fredag og lørdag, var sket en eksplosion med efterfølgende brand i en af reaktorerne på det ukrainske atomkraftværk i Tjernobyl. Udslippet af radioaktive isotoper blev ved i over en uge, hvor forureningen spredte sig med vinden, og straks efter den sovjetiske melding begyndte Risøs strålingsforskere at måle intenst og koordinere indsatsen med både Statens Institut for Strålehygiejne og Civilforsvaret.

»Især var det i første omgang vigtigt at måle forureningen på græsset, for det var lige ved at være årstiden, hvor køerne skulle ud på markerne. Over alt i landet sendte mejerierne mælkeprøver til os for, at vi kunne være sikre på, at mælken ikke var blevet forurennet,« husker chefen for Afdelingen for Strålingsforskning, Benny Majborn.

Den dag i dag er der stadig lande, der kræver et særligt certifikat fra hans afdeling på Risø, før de vil importere mejeriprodukter fra Danmark. Det burde ellers ikke være nødvendigt, for allerede dengang viste Risøs kortlægning ret hurtigt, at det radioaktive nedfald kun ville give ubetydelige strålingsdoser her til lands – doser på mindre end fem procent af den strålingsdosis, vi i løbet af et år udsættes for fra den naturlige baggrundsstråling. At Risø-forskerne alligevel automatisk gik i aktion dengang var helt efter bogen. Allerede ved institutionens fødsel lå det i planerne, at Risø ikke alene skulle være lokomotivet, der sikrede atomenergi i Danmark, men at der til den opgave også hørte mange andre nødvendige ekspertiser. Ikke mindst forståelsen af, hvordan radioaktivitet kan sprede sig i naturen og påvirke såvel miljøet som den menneskelige organisme.

Det var afgørende, at Risø kunne agere rådgiver for landets myndigheder, hvis et radioaktivt udslip fra et kraftværk eller et atomangreb skulle forurene miljøet, vores fødekæde og befolkningen.

Strålingsforskningen var således et af de allerførste felter, der blev etableret på Risø. Allerede i 1956 inden forsøgsanlæggets første bygninger blev opført, blev helsefysikere sendt ud til den lille halvø ved Roskilde for at undersøge den naturlige baggrundsstråling i området, så man vidste, hvad udgangspunktet var, hvis man siden – som den famøse morgen i 1986 – målte en forandring i strålingsniveauet.

I dag er det stadig en af de centrale opgaver for Afdelingen for Strålingsforskning at være en del af Danmarks beredskab, hvis et udslip skulle finde sted. Takket være radioøkologisk forskning kan helsefysikerne nu ret præcist beskrive, hvordan radioaktive stoffer kan spredes med vind og vand og vandre i de biologiske systemer og derigennem kan risikere at ende i vores fødevarer, hvis der f.eks. skulle ske en ulykke på et kernekraftværk i et af vores nabolande.

### **FORTSATTE UNDERSØGELSER AF THULE-ULYKKEN**

En af de første store opgaver, som skulle udfordre centrets strålingsforskere, blev Thule-ulykken i 1968. Søndag eftermiddag den 21. januar styrtede et brændende amerikansk B52-fly med fire brintbomber om bord ned på havisen ud for USA's Thule-militærbase i Nordgrønland og forurenede området med plutonium. Noget blev spredt med røgen fra den voldsomme brand, der opstod, noget blev liggende på isen, og noget sank ned på havbunden, fordi flyet ved nedslaget slog et hul i isen. Selvom det primært var amerikansk militær, der undersøgte skadernes omfang, blev Risø hurtigt involveret i arbejdet. Da de danske repræsentanter ankom, var de første målinger omkring ulykkesstedet allerede foretaget af amerikanerne, men der var stadig behov for yderligere målinger for at sikre, at hverken den grønlandske lokalbefolkning eller de cirka 850 danskere, der arbejdede på Thule-basen, var blevet kontamineret med den plutonium, der var blevet spredt med den voldsomme brand.

Selv om både det amerikanske militær og Risøs helsefysikere dengang konkluderede, at der fandtes meget lidt forurening uden for selve ulykkesstedet, hvor der kun arbejdede amerikansk personale, skulle det politiske efterspil og den danske presses bevågenhed vise sig at blive markant – for hvem havde egentlig ansvaret for ulykken? Fik Danmark hurtig nok besked af USA? Og kunne man egentlig stole på helsefysikernes faglige vurderinger af ulykkens omfang?

Bl.a. derfor har Thule-ulykken haft direkte indflydelse på Risø-forskernes arbejde lige siden, f.eks. i form af løbende undersøgelsesekspeditioner til Grønland, hvor man sammen med de grønlandske myndigheder stadig foretager målinger i området. På lignende vis har Risø flere gange siden Tjernobyl-ulykken sendt ansatte til ulykkesområdet for at tage prøver og undersøge, hvordan man kan re-



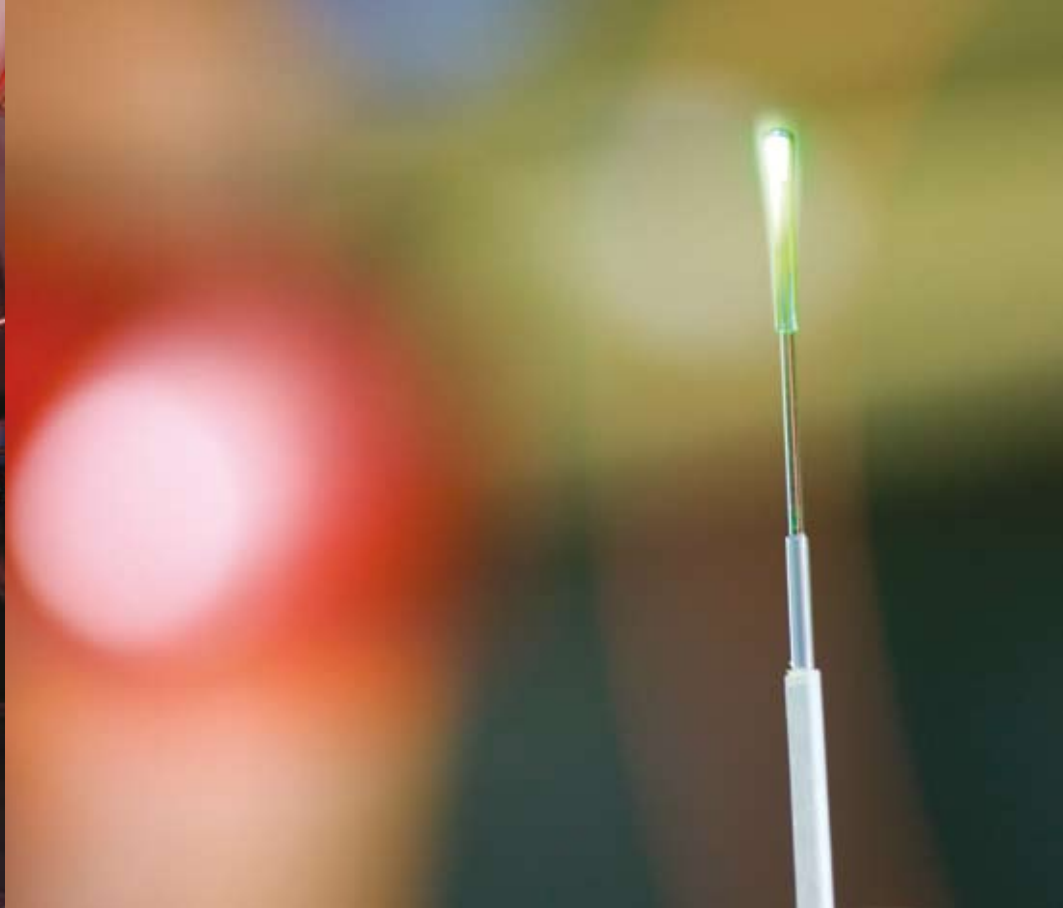


## Nuklearmedicin mod alvorlige sygdomme

Forskningen i nuklearmedicinske metoder på Risø's Hevesy-laboratorium har stor betydning for danske hospitalers kamp mod kræft. Men ud over brugen af radioaktive sporstoffer til identifikation og bekæmpelse af cancer kan nuklearmedicinske metoder også anvendes til andre, alvorlige og stærkt udbredte sygdomme. F.eks. kan man via de udviklede teknikker undersøge blodcirkulationen på personer med åreforkalkning - et afgørende redskab i bekæmpelsen af ikke mindst hjerte-kar-sygdomme, der trods et fald i de senere år stadig er den næsthøypigste dødsårsag i Danmark. Hvert femte dødsfald i Danmark skyldes hjerte-kar-sygdomme.

Et andet vigtigt sygdomsområde, som den nuklearmedicinske forskning er med til at bekæmpe, er sygdomme, der resulterer i svigtende hjernefunktion og demens. Via sporstofteknikker kan man således analysere antallet og aktiviteten af receptorer i hjernen. Også inden for dette område arbejder Hevesy-laboratoriet tæt sammen med hospitaler og medicinalindustrien. F.eks. har forskerne et løbende samarbejde med medicinalvirksomheden GE Healthcare om at udvikle en metode, hvor man fysisk kan måle på patienter, om de er ved at udvikle Alzheimers, så man kan diagnosticere sygdommen tidligere end i dag. Sygdommen kan udsættes med medicin, men ikke helbredes.

Alzheimers er en sygdom, der typisk udvikler sig gradvist over måneder og år, så derfor kan det være afgørende i hjælpen for den enkelte patient at kunne identificere sygdommen tidligt. Alzheimers forårsager, at nervecellerne i flere områder af hjernen langsomt går til grunde. Det anslås, at der i Danmark opstår cirka 15.000 nye tilfælde af demens hvert år. I alt menes 70.000-80.000 personer i Danmark at lide af en demenssygdom, og over halvdelen af tilfældene skyldes Alzheimers.



ducere forureningen. Alt sammen undersøgelser, der er en del af Risø's internationale engagement og udveksling af videnskabelig viden med udenlandske kolleger.

### PRÆCIST AFMÅLTE DOSER STRÅLING

Et af de områder, hvor Risø's afdeling for strålingsforskning høster international anerkendelse og i mange år har været blandt de førende, er inden for forskning i og udvikling af metoder til dosimetri, altså den del af helsefysikken, der beskæftiger sig med måling og beregning af stråledosis. F.eks. har afdelingen udviklet et apparatur til måling af såkaldt optisk stimuleret luminescens, som både kan bruges til dosimetri og til datering af geologiske sedimenter og arkæologiske prøver som f.eks. keramik. Dette apparatur er under stadig udvikling og sælges i dag til forsknings- og dateringslaboratorier verden over.

Som en ny udvikling arbejder afdelingen også tæt sammen med landets hospitaler i brugen af dosimetrimetoder, der benyttes til at bestemme og verificere strålingsdoser i forbindelse med cancerterapi. Risø's forskere bruger i den forbindelse et meget lille dosimeter, der sidder for enden af et optisk fiberkabel. Kablet føres ind i patienten, hvorefter man kan måle strålingsdosis på et bestemt sted i eller uden for en cancersvulst og dermed verificere, om patienten får præcis den rigtige dosis.

Hovedparten af Risø's arbejde inden for strålingsforskning er i dag delt op i tre områder. Foruden strålingsfysikken og radioøkologien omfatter det arbejde i det såkaldte Hevesy-laboratorium, stedet hvor Risø-forskerne producerer og anvender radioaktive isotoper til udvikling af medicinske diagno-



Optisk Stimuleret Luminescens-udstyr (tv.). OSL  
måler, hvor kraftig en dosis stråling, for  
eksempel en kræftpatient får. Med en sonde  
(th.) placeres et lille korn af særligt materiale  
ved svulsten, der skal bestråles. Kornet optager  
en smule af strålingen. Når det belyses,  
udsender det selv lys, der kan bruges til at  
afgøre, hvor meget stråling, der er modtaget.

stik- og behandlingsmetoder. Det der i daglig tale også kaldes nuklearmedicin. Hevesy-laboratoriet blev indviet i 2005. Det er opkaldt efter ungarenen George de Hevesy, der i 1943 modtog Nobelprisen i kemi for sin opdagelse af, hvordan man via radioaktive sporstoffer kan studere kemiske processer i biologiske systemer, herunder den menneskelige organisme.

Grundlæggelsen af arbejdet med sporstofteknikker rækker ligesom radioøkologien helt tilbage til Risøs første år. Ja faktisk rækker denne forskning helt tilbage til 1930'erne, hvor Hevesy arbejdede tæt sammen med Niels Bohr på Niels Bohr Institutet i København. Derfor fandt Risø det helt på sin plads at opkalde sit nye laboratorium efter ungarenen. Men først ville man naturligt nok spørge Hevesys efterkommere om lov til at bruge hans navn. Derfor skrev afdelingen et brev til Hevesys ældste datter, der bor i Californien, og hun svarede hurtigt – og det endda på perfekt dansk. Familien så meget gerne, at Risø opkaldte laboratoriet efter Hevesy og ville også gerne være repræsenteret ved indvielsen.

»Vi havde så ventet, at der ville komme nogle få repræsentanter fra familien til indvielsen. Men nej, der kom hele 13 familiemedlemmer, bl.a. tre af Hevesys fire egne børn, der havde betragtet Niels Bohr som en slags onkel,« fortæller Benny Majborn.

De aktiviteter, der udføres på Hevesy-laboratoriet, rækker grundlæggende tilbage til Risøs begyndelse. Allerede dengang havde medlemmerne af Atomenergikommissionen, der dengang var Risøs styrende organ, forudset, at fremtidens nuklearforskning ikke kun handlede om energi, men i høj grad også om medicin. Særligt formanden Niels Bohr er at kreditere for dette.

»Inden han døde, forudså han, at molekylærbiologen ville blive det næste store skridt inden for forskningen. Det viser noget om Bohrs format. Og vi er stolte af, at det er os, der sidder her og viderefører en flot dansk tradition, som er startet af Bohr og Hevesy,« siger Hevesy-laboratoriets leder, Lars Martiny.

## NYE METODER TIL AT OPDAGE OG BEHANDLE CANCER

Hevesy-laboratoriet forsker primært i at udvikle metoder og redskaber, der kan bruges til at spore og diagnosticere cancer. Desuden arbejder forskerne på at udvikle og fremstille nye stoffer, der kan angribe den cancer, der bliver fundet. Og sidst, men bestemt ikke mindst, fremstiller Hevesy-laboratoriet også radioaktive sporstoffer, som anvendes i PET-scannerne rundt omkring på de danske hospitaler.

PET-scanning er en billedundersøgelse, hvor patienten får sprøjtet radioaktivt mærkede sporstoffer ind i kroppen, inden scanningen foregår. Den helt grundlæggende teknik i brugen af sporstoffer

OSL-kornene er omkring 0,1 mm i diameter. De kan gemmes og aflæses flere gange. Her ses prøveholdere. Hver af de runde holdere i hjulet kan rumme 100 korn.

går kort fortalt ud på at sætte de radioaktive isotoper fast på et såkaldt targetmolekyle, der enten binder til særlige celler, f.eks. en kræftcelle, eller naturligt opkoncentreres i specielle vævstyper. Metoden kan bruges både til at identificere, hvor kræften sidder – som det sker i en PET-scanning – eller til direkte at angribe sygdommen, afhængig af, hvilken slags isotoper man anvender.

»Nogle isotoper er gode, når man skal scanne sig frem til canceren, andre isotoper er gode til at slå canceren ihjel,« forklarer Lars Martiny.

Selv om nogle af hospitalernes PET-centre selv kan producere og udvikle de radioaktive sporstoffer, er behovet i dag så stort, at de ikke altid kan følge med. Her kan Risø supplere med sin produktion. De radioaktive sporstoffer, der bruges i sporstofundersøgelser – og i Risøs egen forskning – har man selv fremstillet lige siden 1960'erne. I de første mange år skete det i forsøgsreaktor DR2 og siden DR3. Men efter reaktorernes nedlæggelse og den efterfølgende etablering af Hevesy-laboratoriet, er det en såkaldt cyklotron – populært kaldet en protonpistol – der i en bunker under Risøs græsplæne producerer de radioaktive stoffer, der skal bruges til forskningen.

»Skal vi producere til flere patienter på hospitalerne, er vi i gang mellem klokken fire og fem om morgenen og sender det ud af døren klokken syv,« fortæller Lars Martiny: »Mellem syv og otte foretager vi kvalitetskontrol, og klokken otte kan vi faxe til hospitalerne med besked om, hvorvidt de må bruge det«.

Når Risø har sagt god for materialet, sprøjter en læge stoffet gennem en kanyler ind i patientens arm, hvorfra det sendes rundt med blodet i kroppen. En halv time efter foretager man scanningen.

»Vi har fysikere, kemikere og farmaceuter ansat, men vi har ingen scannere, så derfor er vi afhængige af samarbejdsaftaler, bl.a. via vores tætte samarbejde med Panum Institutet og de store hospitaler,« siger Lars Martiny, der ligesom Benny Majborn forudser, at Risøs strålingsforskere også i fremtiden vil dedikere mere og mere af deres tid på udviklingen af sundhedsrelateret teknologi.

»Vi er glade for at kunne bidrage til forskningsområder, der så direkte kan være med til at redde menneskeliv,« siger Benny Majborn.



## Strålingsforskning til medico, geologi og VVS

Risøs strålingsforskere arbejder også med industriel dosimetri, som anvendes i forbindelse med sterilisering af medicinsk udstyr. Kunsten her er at ramme den helt rette dosis af stråling for at sikre, at missionen lykkes, uden at produktet bliver beskadiget.

Radioaktive isotoper anvendes dog ikke udelukkende til medicinske formål. Afdelingen fremstiller også tekniske isotoper. Aftagerne kan for eksempel være VVS-firmaer, der bl.a. foretager lækagesporing af centralvarmeanlæg, der mister vand. Takket være de radioaktive isotoper kan man spore, hvor lækagen findes.

Også andre faggrupper drager nytte af strålingsforskningen. F.eks. kan strålingsforskerne yde assistance til både geologer og arkæologer, når de skal datere en geologisk aflejring eller et arkæologisk fund. Hvis et poteskår eller et sediment har ligget beskyttet mod dagslys, inden materialet blev fundet, vil det i hele den givne periode have opsamlet strålingsenergi. Risø har udviklet en luminescens-dosimetri-metode, som kan bestemme, hvor meget strålingsenergi prøven har akkumuleret. Dermed kan man udregne hvor lang tid, den har ligget det pågældende sted.

Ved måling af den akkumulerede strålingsdosis i en mursten eller et andet egnet materiale kan man også bestemme, hvor meget stråling beboerne i et hus eller område er blevet udsat for efter en nuklear ulykke. Denne metode er blevet anvendt efter Tjernobyli-ulykken. Datering af geologiske sedimenter på jorden foretages af mange laboratorier rundt omkring i verden ved brug af det på Risø udviklede apparatur. Risø er selv i gang med at undersøge mulighederne for en mere eksotisk anvendelse, nemlig datering af sedimenter på Mars.

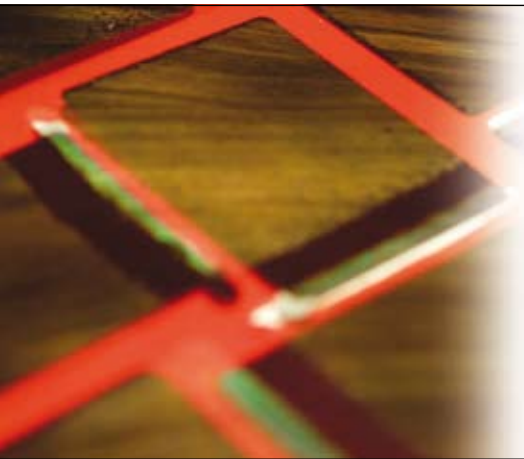


## Undervisning spreder viden



**EN SPÆNDENDE INTERNATIONAL**, tværfaglig og ung arbejdsplads. Sådan er Risø ofte blevet karakteriseret af ph.d.-studerende og andre, som har fået chancen for at gennemføre en del af deres uddannelse på forskningscenteret ved Roskilde Fjord. Undervisning er ikke nyt for Risøs forskere; men med den nye status som nationallaboratorium for bæredygtig energi ved Danmarks Tekniske Universitet har Risø fået endnu flere muligheder for at præge morgendagens energiteknologiske eksperter. Indtil 2007 var Risø et sektorforskningsinstitut med den hovedopgave at lave strategisk forskning, det vil sige forskning, som baner vejen for løsninger på udfordringer i det danske samfund. Forskerne





Risø har gennem tiderne haft mange projektstuderende. Fusionen med DTU giver mulighed for at lave nye uddannelser, der trækker på Risøs specielle kompetencer og arbejdsmetode.

var ikke pålagt en undervisningsforpligtelse, men en del af deres tid er alligevel altid gået til at uddanne kommende forskere og vejlede studerende i konkrete projekter. Risøs forskere har således fungeret som medvejledere på ph.d.-projekter. Studerende på kandidatstudiet har kunnet skrive speciale- eller andre projekter på Risø, og mange studerende har gennem årene løst afgrænsede forskningsrelaterede opgaver som studentermedhjælpere. Men det er ikke kun de studerende, der er kommet til Risø, mange forskere har også haft undervisningsopgaver på universiteterne som forelæsere eller adjungerede professorer, og de har desuden på forskellig måde bidraget til at efteruddanne medarbejdere i det private erhvervsliv. Noget af det karakteristiske for Risøs tilbud til de ph.d.-studerende er, at de bliver inddraget i hverdagen og deltager i forskningsopgaverne på lige fod med forskerne.

»På Risø arbejder vi meget tværfagligt og strategisk. Vi laver også grundforskning, men altid med et formål for øje og altid i grupper. Hos os lærer de studerende at arbejde i et team med et klart mål, med klare rollefordelinger og ikke mindst med gode kontakter til erhvervslivet,« fortæller formanden for Risøs koordineringsgruppe for undervisning, programleder Luise Theil Kuhn. De studerende får også adgang til unikt eksperimentelt udstyr og faciliteter, som ikke er standard på de fleste uddannelsesinstitutioner. Samtidig oplever mange en god og tæt kommunikation, både med forskningskollegerne og med samarbejdspartnere i erhvervslivet. Bl.a. derfor har Risø et godt ry blandt studerende.

»Risø er en spændende arbejdsplads, hvor jeg var stolt af at arbejde. Der foregår så meget banebrydende og visionær forskning. Det er også en ung arbejdsplads med mange ph.d.-studerende. Dagligdagen blev aldrig rutine, man fik hele tiden nye udfordringer og blev opfordret til at netværke med





folk fra andre fagområder,« fortæller Thomas Frank Petersen, der afsluttede sin ph.d. på Risø i 2007.

Risø's gode ry blandt studerende har vist sig i internationale evalueringer. Da Risø i 2006 for første gang indgik i analysevirksomheden Universum Communications årlige imageundersøgelse af ingeniør- og naturvidenskabsstuderendes krav og ønsker til fremtidige arbejdspladser, røg de direkte ind på en ottendeplads i konkurrence med over 100 virksomheder. Det var aldrig tidligere sket i Universums mange internationale undersøgelser, at en ny virksomhed røg ind på top-10, og det udløste en pris som Highest Flyer. Det efterfølgende år blev Risø i samme kategori i imageundersøgelsen kåret som den tredjemest foretrukne virksomhed. Resultaterne udtrykker forventninger, der ligger godt i tråd med resultaterne fra Universums tilsvarende undersøgelse blandt over 4.000 færdiguddannede akademikere. Her kom Risø i 2006 ind på en 10.-plads over de mest attraktive virksomheder blandt akademikere med naturvidenskabelig baggrund.

### KANDIDATUDDANNELSE I BÆREDYGTIG ENERGI

Fusionen med DTU giver Risø mulighed for at tilbyde de studerende endnu flere valgmuligheder. F.eks. forventes en ny og højaktuel kandidatuddannelse i bæredygtig energi at starte i efteråret 2008; den er i skrivende stund til godkendelse i Akkrediteringsrådet under Ministeriet for Videnskab, Teknologi og Udvikling.

»Uddannelsen i bæredygtig energi vil skabe kandidater, der virkelig kan gøre en forskel ved at bi-

drage med løsninger på nogle af vor tids vigtigste og helt nødvendige udfordringer inden for klima og energi. Her kan man blive undervist af forskere, der er i spidsen for deres felt, og samtidig ved de også, hvad der er interessant for industrien og samfundet, fordi Risø altid har skullet arbejde med det for øje. Derfor, og på grund af Risøs gode renommé som forskningsinstitution, har uddannelsen naturligt nok tiltrukket sig stor opmærksomhed – ikke mindst i udlandet, hvor over 60 studerende har vist interesse,« forklarer studieleder for den nye uddannelse, Peter Meibom fra Afdelingen for Systemanalyse.

Luise Theil Kuhn har haft ansvaret for at samle de mange forskellige kompetencer på Risø til et sammenhængende og tværfagligt undervisningstilbud.

»Uddannelsen er meget relevant og virkelighedsnær, men lige præcis derfor er den også meget tværfaglig og vil stille store krav til de studerendes baggrundskvalifikationer og deres evne til at tilægge sig ny viden inden for andre fagområder. Netop Risøs forskningsmiljø bør være ideelt i denne sammenhæng,« siger hun.

Samarbejdet med industrien og den høje kvalitet af forskningen på Risø har også resulteret i en ny eliteuddannelse inden for brændselsceller og brint, som Risø udbyder fra efteråret 2009 i samarbejde med studielinjerne fysik og kemi på DTU og med Topsoe Fuel Cell som industriel partner. Uddannelsen har tilknyttet forskere i international topklasse og erfarne undervisere, der står som garant for den høje faglige kvalitet i uddannelsen.

»Det er specielt tilrettelagte kandidatuddannelser for de virkeligt talentfulde studerende. Dem vil vi gerne tage hånd om og udfordre i særlig grad,« forklarer Luise Theil Kuhn.

De mange nye studerende, som kommer til at færdes på Risø, får en central base i Afdelingen for Informationsservice, hvor der bliver indrettet et lyst og åbent studiemiljø med pc-arbejdspladser. Her kan de få it-support og hjælp til informationssøgning. De kan finde inspiration i bogsamlingen og i tidsskrifter. Eller de kan koble af i hyggehjørnet og i den nærliggende fredagsbar, som ph.d.-studerende tog initiativ til for nogle år siden. Men det vigtigste er stadig den kontakt, de vil få med Risøs forskere ude i laboratorierne. Og glæden ved den kontakt går begge veje:

»De studerende har altid lagt og vil også fremover lægge et reelt og værdifuldt stykke arbejde i projekterne, og det er en stor gevinst for arbejdsmiljøet og dynamikken at have dem gående herude,« siger Luise Theil Kuhn.



# Reaktorerne overlevede atomkraften

**SOM DEN STÅR DER**, rund og skinnende i den spæde forårssol, ligner Risøs pensionerede forsøgsreaktor nærmest en forstørret kornsilo omgivet af bølgeblik. Det skal man dog ikke lade sig forvirre af. For der hersker ingen tvivl om, at den største forsøgsreaktor DR3 på halvøen i Roskilde Fjord har stået model til mange avancerede eksperimenter og teknologiske bedrifter, siden den for første gang blev taget i brug i 1960. I dag er aktiviteterne lukket ned på både DR3 (2000) og de to mindre søskende DR1 (2001) og DR2 (1975). Men i deres aktive alder var Risøs tre forsøgsreaktorer på mange måder det mest håndgribelige symbol for offentligheden på stedets mange aktiviteter. Så meget, at medar-

Bygningen der rummede Risøs DR2-reaktor.

Denne blev lukket ned i 1975, mens DR3 og

DR1-reaktorerne var i drift til henholdsvis 2000

og 2001.

Nedenunder: Toppen af et brændselement til

DR3 reaktoren.



**Risø blev bygget op om tre atomreaktorer, men selv om atomkraften kom i modvind i Danmark, blev de ved med at sætte Risø på forskningens verdenskort. Særligt den største reaktor og den materialeforskning, den blev brugt til, har vist sig værdifuld.**

bejdere fra andre forskningsfelter fra tid til anden kunne blive irriterede over at blive spurgt om, hvad de dog lavede ude på 'atomstationen'.

Det er dog langt fra uden grund, at reaktorerne og arbejdet med dem har stået som det, der har defineret Risø i en stor del af forskningsinstitutionens historie. Reaktorerne var fra begyndelsen Risøs ryggrad, og længe efter at Folketinget i 1985 sagde endeligt nej tak til atomkraft, var arbejdet med reaktorerne, særligt DR3, en meget vigtig del af Risøs aktiviteter. Risø havde i hovedparten af reaktorerne levetid en væsentlig indkomst fra produktion af silicium til halvledere og isotoper til bl.a. medicinsk forskning i reaktoren, og flere af de forsknings- og udviklingsområder, der i dag markerer Risø internationalt, kan trække deres aner tilbage til fysik- og materialeforskningen, som er udført omkring reaktorerne.

Et eksempel er udviklingen af materialer til brændselsceller. Det er startet med grundlæggende studier af faste elektrolytters egenskaber. Et andet er Risøs grundlæggende materialeforskning, der for en stor dels vedkommende er blevet bygget op omkring forsøgene med neutronspreddning ved DR3. Men reaktorerne har også haft en afsmittende effekt på andre områder. Behovet for at vide, hvordan stråling ville sprede sig med vinden, hvis der skulle ske et nukleært udslip, skabte grundlaget for en forskningsgruppe i meteorologi. Kendskabet til vindforholdene tæt ved jordoverfladen skabte senere basis for Risøs forskning i vindenergi.

Lige fra Risø blev indviet i sommeren 1958, var det grundlæggende mål med centret at sikre, at Danmark fulgte med i den internationale udvikling i fredelig udnyttelse af atomteknologien. Det domi-



nerende felt var atomkraft, og i den sammenhæng skulle reaktorerne – og de mange forskere, der blev tilknyttet dem – agere lokomotiv for udviklingen af atomkraftværker på dansk jord.

Forskningen i kernekraft skulle på én gang understøtte vores internationale renommé som forskningsnation – vi var jo hjemlandet for den anerkendte atomfysiker og nobelpristager Niels Bohr – og løse danskernes energiproblemer på lang sigt. En udfordring, som mange dengang mente, var nødvendig at løse, hvis vi danskere skulle bevare vores levestandard. Energimæssigt var Danmark på det tidspunkt ekstremt sårbar ved at være næsten totalt afhængige af importeret kul og olie. Helt centralt for bordenden i hele denne politiske og strategiske proces sad netop Niels Bohr sammen med departementchef Hans Henrik Koch.

Cirka tre år før Risø blev indviet, havde Folketinget nedsat Atomenergikommissionen med nobelpristageren som formand. Kommissionen, der blev etableret i december 1955 formåede – efter stor indsats fra især Bohr og Koch – at overbevise den socialdemokratiske regering om, at ikke bare var det nødvendigt at satse på atomkraft. Man skulle satse i et omfang, der hidtil var uhørt i dansk forskning. Risø byggede og byggede, og budgetterne voksede, til stationens driftsbudget i 1960 var på mere end 30 millioner kroner om året. Til sammenligning lå de samlede udgifter til den danske tekniske forskning samme år på omkring 100 millioner kroner.

## DE STORE INVESTERINGER OG FORANDRINGER

I 1957 havde man købt de to første reaktorer – DR1 og DR2 – af amerikanerne. Derudover planlagde man at arbejde med at udvikle en særlig dansk type reaktor – en, der kunne udnytte naturligt forekommende uran. Håbet var, at uranforekomsterne i Grønland i givet fald kunne gøre Danmark selvforsynende med energi. Endelig var der medlemmer af Atomenergikommissionen, der ønskede en tredje – og større – reaktor, som i modsætning til letvandsreaktorerne DR1 og DR2 var baseret på tungt vand og dermed bedre egnet til ikkeberiget uran. Dette sidste køb skabte en for Atomenergikommissionen usædvanlig voldsom diskussion. Kritikerne så på de voksende budgetter og vurderede, at der ikke var reelt brug for tre reaktorer. Fortalerne – herunder Bohr – fastholdt, at skulle Risø og Danmark gøre sig gældende internationalt, havde man brug for DR3 også. Bohrs side vandt diskussionen, og DR3 blev indkøbt. Det skulle senere vise sig at være en klog investering.

Diskussionen om DR3 var et forvarsel om, at de store bevillinger til Risø var begyndt at blive en tand for store for andre dele af den danske forskningsverden. De første år i 1960'erne var præget af voksende diskussioner både udadtil og internt i Atomenergikommissionen, om institutionen kunne





## Atomkraft fylder mindre

Verdens første civile atomkraftanlæg var sovjetisk. Den 27. juni 1954 begyndte kernekraftanlægget i den sovjetiske forskningsby Obninsk for første gang at producere elektricitet til byens elnet. Reaktorens effekt var på blot fem MW, mindre end hvad en enkelt af vore dages største vindmøller kan producere. I 1956 åbnede det første kommercielle atomkraftværk i Sellafield i Storbritannien (på 50 og senere udbygget til 200 MW) og året efter startede det første a-kraft-værk i USA.

Gennem 60'erne, 70'erne og første halvdel af 80'erne steg brugen af atomkraft voldsomt, godt hjulpet på vej af oliekriserne. Men efter ulykken på atomkraftværket på Tre-Mile-Øen i USA i 1979 og Tjernobyl-ulykken i 1986 gik byggeriet af nye reaktorer næsten i stå. Trenden holdt gennem 1990'erne, bl.a. fordi lave priser på naturgas holdt investorerne fra at foretage de meget store investeringer, som nye a-kraft-værker udgør. Eksisterende værker er dog blevet effektiviseret, og i dag leverer verdens atomkraftværker næsten dobbelt så mange kW-timer, som de gjorde i 1986. Alligevel står atomkraft (i 2005) blot for omkring 15 procent af verdens samlede elektricitetsforsyning, hvilket er en smule mindre end i atomkraftens storhedstid fra midt-80'erne til midt-90'erne.

Øget fokus på drivhuseffekt og nye reaktortyper har rejst spørgsmålet om, hvorvidt atomkraft kan komme til at spille en væsentlig større plads i det miks af energikilder, der skal tage over efter olie. Det Internationale Energiagentur vurderer dog, at selv om kapaciteten på verdens eksisterende - og nye - atomkraftværker vil stige, vil den næppe følge med den generelle stigning i verdens elektricitetsproduktion, og atomkraft vil spille en stadig mindre rolle for verdens energiforsyning.

Kilde: IAEA, IEA



lægge beslag på så stor en del af de danske forskningsmidler og teknisk uddannede arbejdskraft alene med det formål at udvikle grundlaget for atomkraft i Danmark. Arbejdet med at udvikle en særlig dansk reaktortype gjorde heller ikke de fremskridt, man havde håbet på, og i 1964 stoppede man den del af arbejdet på Risø. Samtidig blev det besluttet, at institutionen skulle have et bredere formål. Atomenergiaktiviteterne på Risø blev nu suppleret med anden forskning, der kunne udnytte reaktorerne. Men fra starten blev det slået fast, at Risø ikke skulle være et rent grundforskningscenter. Grundforskning og teknologisk forskning skulle følges ad, og Risø skulle bedrive grundforskning med anvendelse for øje.

### VELEGNET TIL FORSKNING

De tre forsøgsreaktorer fik adskilte opgaver. DR1 blev frem til sin lukning i 2001 – reaktoren var den sidste, der lukkede ned – udelukkende brugt til undervisningsformål. DR1 havde en maksimal termisk effekt på to kW, svarende til en elektrisk kogeplade, og var så lille, at den kunne tændes og slukkes i løbet af få minutter. Man kunne tænde den om morgenen, og når sidste mand gik om aftenen, skulle han huske at slukke lys og reaktor.

Mens det mindste medlem af reaktorfamilien således havde en meget klart afgrænset funktion, var der i begyndelsen mere overlap mellem arbejdet på DR2 og DR3. Siden overgik de fleste aktiviteter inden for avanceret grundforskning dog til DR3, mens DR2 primært fik mere konkrete opgaver for industrien, såsom fremstilling af isotoper til medicinalindustrien og forskellige former for sporing, f.eks. af lækager i bygningskonstruktioner.

Det er arbejdet på DR3, der virkelig har placeret Risø på verdenskortet over forskningscentre inden for reaktortechnologi og en række afledte forskningsfelter. DR3 blev primært anvendt inden for fire områder. Et af dem var forsøg med reaktormaterialer og brændselsstave til reaktorer. Dette arbejde blev i starten udført i samarbejde med henholdsvis B & W og med Helsingør Værft, der var udset til at være leverandører af henholdsvis reaktortanke og brændselsstave, hvis Danmark skulle have atomkraft. Forsøgene med brændselsstavene sigtede mod at udnytte dem bedst muligt, så kernekraftreaktorerne fik bedre økonomi og producerede mindre affald. Dette arbejde fortsatte på Risø frem til 1990, i de sidste år med internationale kunder – typisk kraftværker eller sikkerhedsmyndigheder.

DR3 viste sig at være en glimrende neutronkilde. Det vil sige, at en del af de neutroner, der dannes under kernespaltningerne i reaktoren kunne trækkes ud til brug i både forskning og produktion af særlige materialer. Et eksempel på det sidstnævnte var produktion af doteret silicium, der i en årrække

Materialeforskerne på Risø søger blandt andet at udvikle nye superledende materialer (tv.), der fungerer ved højere temperaturer end i dag. Superledere kan blandt andet gøre nye vindmøller mere rentable.

var en af Risøs kommercielle succeser. Dette arbejde, der primært foregik i samarbejde med virksomheden Topsil A/S, gik ud på at bestråle silicium med neutroner. Bestrålingen omdanner en del af siliciumatomerne til fosfor, og på den måde øger man halvlederen siliciums ledningsevne mange gange, hvilket udnyttes f.eks. i produktionen af computerchips. I 1992 blev 30 procent af verdens fremstilling af doteret silicium til halvlederproduktion skabt på Risø. Fremstillingen foregik oprindeligt på DR2, men overgik til storebroderen i 1975, i forbindelse med at DR2 blev lukket. Dette arbejde fortsatte på DR3, til den blev lukket ned i 2000. DR3 blev på lignende vis anvendt til undersøgelser af boreprøver fra Nordsøens undergrund. Når prøverne var bestrålet kunne man bestemme prøvens indhold af forskellige grundstoffer. Denne viden kunne bruges til at fastsætte undergrundens geologiske historie – og dermed potentialerne for at finde olie og gas. Endelig blev DR3 efter DR2's nedlukning i stor stil brugt til produktion af isotoper til medicinsk forskning, diagnostik og behandling.

Det var ikke givet fra starten, at DR3 skulle blive så god en kilde til forskning med neutroner. Andre steder i verden var der forsøgsreaktorer med større effekt og dermed flere neutroner pr. sekund. Flere neutroner pr. sekund giver flere data for forskerne og dermed skarpere billeder af, hvad der foregår inden i det stof, man undersøger, men forskerne på Risø kompenserede ved at udvikle metoder til at få det bedste ud af DR3's trods alt begrænsede mængde neutroner. Denne 'neutronoptik' er senere blevet kopieret flere andre steder i verden.

Det fjerde vigtige arbejdsområde for DR3 trak netop på ekspertisen i arbejdet med neutronbestråling. Det var materialeforskningen. Når man analyserer, hvorledes neutronerne spredes mod materialerne, kan man få vigtig information om atomernes positioner og bevægelser inden i materialet. Materialeforskningen på Risø har i tidens løb spændt meget bredt fra analyser af, hvad der sker i plastik, når det strækkes – hvorfor bliver indkøbsposer for eksempel stærkere, når de er så fyldte, at hanken er lige ved at falde af? – til udvikling af ultrastærke magneter til industribrug og forsøg med superledende materialer, der kan lede strøm uden spild og potentielt kan blive en revolution på alle de områder, hvor man i dag bruger elektricitet.

## FORSKNINGEN FORTSÆTTER

Flere af de forskningsfelter, der udnyttede reaktorerne, er stadig aktive på Risø. Et eksempel er netop forskningen i superledere. De specielle stoffer, der kan lede strøm uden tab, spiller en afgørende rolle i udviklingen af nye energiteknologier, som Risø er involveret i. Et centralt eksempel er udvikling af superledende materialer til generatorer i fremtidens megawatt-vindmøller. Det forventes, at genera-

Risø's tre reaktorer: DR1 (ø.v. tv.), DR3 (bygningen set udefra, ø.v. th.) og DR2 (ned.). DR2 blev lukket i 1975, men DR1 fortsatte til brug i undervisning, og DR3 var et vigtigt instrument for Risø's forskning. Reaktoren var en glimrende kilde til neutroner, der kan bruges til materialeforskning.

tores vægt og volumen kan reduceres til en tredjedel ved brug af superledende komponenter. Superledere anvendes også til elkabler og de spiller en afgørende rolle i udviklingen af fremtidens mulige fusionsreaktorer. Fusion er den proces, der skaber energien i solen, og skal man håndtere de mange millioner grader varme stoffer i en fusionsreaktor, er det nødvendigt, at de holdes i skak af meget kraftige magnetfelter. Dem kan superledere skabe. Allerede i dag bruges superledende magneter blandt andet i hospitalernes MR-skannere og ved store forskningscentre som højenergifysik-centret CERN i Schweiz, men de skal være kølet voldsomt ned, før de virker. Målsætningen er derfor at fremstille superledere, der virker ved højere temperaturer og har bedre egenskaber, så teknologien bliver mere økonomisk. Neutronspretningsforsøg er stadig meget vigtige i dette arbejde. I dag tager Risø's forskere derfor til neutronkilder i udlandet for at gennemføre disse forsøg.

At forskningen med Risø's reaktorer stadig skulle have så stor indflydelse på institutionens arbejde ved dets 50-års jubilæum, var svært at forudse dengang i 1970'erne, hvor den folkelige strømpil begyndte at pege længere og længere væk fra brugen af a-kraft på dansk jord. Allerede i slutningen af 1960'erne begyndte efterkrigstidens store tiltro og hyldest til teknologiske fremskridt at fordufte. Udviklingen satte for alvor i gang med blomsterbørnernes ungdomsoprør, modstanden mod Vietnamkrigen og den voksende frygt for atomkrig, efterhånden som stadig flere krigsrædsler flød live gennem fjernsynet og ind i danskernes dagligstuer.

Da verden i 1973 blev kastet ud i den første omfattende oliekrise, så det dog pludselig ud til, at atomkraft kunne blive en realitet i Danmark. Det fik for alvor elskelighederne til at interessere sig for atomkraft, og flere værker blev planlagt. Men folkestemningen var imod. I 1976 var de folkelige protester mod a-kraft blevet så omfattende, at statsminister Anker Jørgensens S-regering besluttede at udskyde den endelige beslutning om atomenergi på dansk jord, indtil man i det mindste havde fundet en teknologisk løsning på, hvordan man sikkert kunne opbevare det radioaktive affald fra kraftværkerne.

På Risø læste man også skriften på væggen og begyndte at brede aktiviteterne endnu mere ud, så atomkraften kom til at fylde mindre og mindre i institutionens arbejdsplan. Langt før Folketinget i 1985 traf den endelige beslutning om at tage a-kraften helt ud af den danske energiplan, havde Risø således løbende omstillet sig, så stadig færre aktiviteter koncentrerede sig om atomenergi, og flere og flere ressourcer overgik til forskning i alternativ energi.

Vemodigt var det dog, den dag medarbejderne fik at vide, at hjertebarnet DR3 skulle lukke. Og det var langt fra en enig medarbejdergruppe, der blev kaldt op i Niels Bohr-Auditoriet på Risø og fik at vide, at den sidste reaktor ville lukke i 2001. I dag er reaktorerne under afvikling, men arbejdet, der startede omkring dem, fortsætter på Risø.



En æra pillet fra hinanden



DR1 blev som Danmarks første reaktor sat i gang den 15. august 1957. Reaktoren blev også den sidste af de tre reaktorer, der blev taget ud af drift. DR1 var en såkaldt homogen reaktor, hvor brændslet var direkte opløst i let vand. DR1 havde en maksimal termisk effekt på to kW, hvilket svarer til en elektrisk kogeplade. Dekommissioneringen af DR1 var færdig i 2005. DR2 blev tændt første gang den 9. december 1958. Af besparelseshensyn blev driften allerede indskrænket i 1963, og i 1974 besluttede man at tage reaktoren ud af drift året efter.

DR3 var en tungvandsreaktor med en termisk effekt på 10 MW - til sammenligning var Barsebäck 1-reaktoren (der lukkede i 1999) på 1800 MW. Lige siden midten af 1970'erne har det reaktorteknologiske arbejde været under afmontering på Risø. Efter DR2's lukning i 1975, fulgte det såkaldte Hot Cell-anlæg (hvor man håndterede stærkt radioaktive genstande) efter i 1989. Beslutningen om at lukke de to sidste forsøgsreaktorer - DR3 og DR1 - blev truffet i 2000.

I 2003 bevilgede Folketinget midler til en særlig institution - Dansk Dekommissionering - med specialviden inden for håndtering og demontering. Arbejdet forventes i alt at vare cirka tyve år. Indtil videre er DR1 helt væk, mens DR2 er ved at blive afmonteret. DR3 er endnu ikke skilt ad, men brændslet er taget ud, og det tunge vand drænet fra det primære kølesystem. Brændslet er sendt til USA i overensstemmelse med en aftale om returnering af brugt brændsel.

*Kilde: Dansk Dekommissionering*





## Risø fik styr på helheden

»**DER VAR IKKE** plads til os nogen steder, så vi sad i tre skurvogne for foden af den gamle reaktor-teknikafdeling med en pragtfuld udsigt til Roskilde fjord og svanerne, der tungt fløj forbi som jumbojetter. Skurvognene var varmet op med elvarme, så hvis vi om vinteren havde efterladt en sjat te i kruset fredag eftermiddag, var det frosset, når vi mødte mandag morgen. Vi følte os virkelig som pionerer, og det var vi vel også på det tidspunkt«.

Seniorforsker Poul Erik Morthorst får et smil på læben, når han mindes de første par år i slutningen af 1970'erne i energisystemgruppen, der i dag er en del af Afdelingen for Systemanalyse.



70'ernes energikrise med bilfrie søndage og kolde stuer blev startskuddet til, at energiplanlægning og alternative energikilder blev politisk interessante. For Risø betød det oprettelsen af Energisystemgruppen, der hjalp regeringen med de første nationale energiplaner. I dag er udfordringen at designe fremtidens bæredygtige energisystemer.

Nok er Energisystemgruppens tid som pionerer i skurvogne overstået for længst, men her godt 30 år senere er gruppens arbejde mere relevant end nogensinde. De kommende klimaforandringer og ønsket om at blive mindre afhængige af fossile brændstoffer har øget presset for at få indført vedvarende energi, så hurtigt som muligt, og det stiller store krav til, hvordan man indretter energisystemerne. Den vedvarende energi skal passes ind i systemet på en sådan måde, at f.eks. strømmen fra vindmøller udnyttes optimalt, og det sikres, at der også er strøm i kontakterne, når vinden har lagt sig. Netop den problemstilling – at fastholde stabiliteten i et energisystem med en stadigt stigende andel af omskiftelige vedvarende energikilder og samtidig tage hensyn til at energiforbruget skal være så CO<sub>2</sub>-neutralt som muligt – er kernen i Afdelingen for Systemanalysens arbejde.

## BARN AF ENERGIKRISEN

Knappe ressourcer var årsagen til, at Risø søsatte energisystemgruppen. Yom Kippur-krigen mellem Israel og flere arabiske lande i 1973 medførte, at leverancerne af olie svandt drastisk ind, og priserne røg i vejret med 300-400 procent. Energiforbruget havde gjort sit indtog, og der var ikke længere olie til at producere tilstrækkelig strøm på kraftværkerne til at dække danskernes behov. Dengang stod det sorte guld for 90 procent af energiforbruget i Danmark. For at spare på olien forbød man bl. a. privat bilkørsel om søndagen, og interessen for andre energikilder tog fart. I 1976 kom så den første samlede politiske plan for udviklingen i den danske energiforsyning. 'Dansk Energilpolitik 1976' tog udgangs-

Solceller og biobrændsler forventes at komme til at spille en større rolle i fremtidens energisystemer. Det er nogle af konklusionerne i Risø Energy Report 6 fra 2007.

punkt i oliekrisen, og målet var at formindske afhængigheden af olie, i første omgang ved at satse på naturgas og atomkraft og i mindre grad på kul og vedvarende energier. Atomkraft-planerne blev dog hurtigt sat på standby og helt aflyst i 1985, men kul, naturgas og – så småt – vedvarende energikilder fik i de følgende år en større plads i den danske energiforsyning.

Oliekrisen viste, at der var brug for mere viden om energikilder, og hvordan de kunne bringes i anvendelse. Der blev afsat 50 millioner kroner på finansloven til energiforskning, og den daværende bestyrelsesformand for Risø, Erik Ib Schmidt, gik straks i forhandlinger med Handelsministeriet og fik en del af forskningsmillionerne til fire projekter – energilagring, vindkraft, fusionsforskning og modelberegninger. Det sidste projekt skulle bidrage til arbejdet i regeringens nye Varmeplanudvalg under Handelsministeriet, der skulle udtænke en måde at udforme en ny varmeplanlægning for hele landet.

### TVÆRFAGLIGHED I FOKUS

Handelsministeriet inviterede efterfølgende Risø til at deltage i en styregruppe for landets varmeplanlægning. Her viste der sig hurtigt et behov for at kunne lave dybdegående analyser af økonomiske, tekniske og ressourcemæssige forhold samt af sammensætningen i energiforsyningen. Det førte til etablering af den seks mand store energisystemgruppe den 6. september 1977. Ove W. Dietrich fra Risøs daværende fysikafdeling blev projektleder, men det var chefen for Afdelingen for Reaktorteknik, Bjarne Micheelsen, som var den primære idémand bag gruppen. På det tidspunkt havde Risø adskillige forskningsgrupper, der arbejdede med nye teknologier inden for alternative energiformer. Men energisystemgruppen var den første gruppe, som arbejdede på tværs af Risøs forskellige forskningsfelter med teknologi, økonomi, energisystemer og miljø i fokus på én gang.

»Man indså, at det nok var en god idé at have nogle teoretikere, som kunne kigge på tværs af tingene og se på, om teknologierne kunne bruges til noget, hvad det kostede, og hvad miljøkonsekvenserne var,« forklarer chefen for den nuværende Afdelingen for Systemanalyse Hans Larsen, som i 1980 overtog ledelsen af gruppen, der dengang talte 12 akademikere ligeligt fordelt mellem økonomer og teknikere, altså ingeniører og fysikere.

Den nyetablerede energisystemgruppes formål var, så objektivt som muligt, at spå om fremtidens energibehov og den optimale sammensætning af energiproduktionen. I starten var der meget fokus på beskæftigelsen, valutabalancen og kun i mindre grad på miljøet. Arbejdsredskabet var energisystemanalyser, hvor diverse scenarier kunne simuleres i datamaskiner. Ved at skrue op og ned for forskellige parametre, som pris og udbud og efterspørgsel på olie og kul, kunne disse modeller spå om et



## Risø Energy Report

83

Siden 2002 har Risø hvert år udgivet Risø Energy Report. Formålet med rapporten er at give råd om, hvad Risøs forskning i bæredygtige energikilder kan bruges til, og hvad der er de bedste løsninger. Den nyeste rapport, Risø Energy Report 6, udkom i november 2007 og tager udgangspunkt i EU's to største energiudfordringer: At mindske udledningen af CO<sub>2</sub> ved at udvikle og indføre flere bæredygtige energikilder samt at sikre forsynings-sikkerheden. Halvdelen af Europas forbrug af fossile brændstoffer er nemlig importeret, og andelen forventes at stige til 65 procent i 2030. Rapporten kommer med en række konklusioner/anbefalinger, bl.a.:

- Brændselsceller er tæt på et gennembrud og bør bruges til en mere effektiv energiomsætning, f.eks. som erstatning for olie- og gasfyr i huse.
- Danmark vil kunne spille en hovedrolle i udviklingen af fremtidens fleksible energisystem.
- Solcelleteknologien er i kraftig vækst, men er stadig en dyr løsning. Risø arbejder på polymersolceller, der er mindre effektive, men billigere. Danmark kan opbygge en industri inden for området, hvis der gives offentlig støtte.
- Andengenerationsbiobrændsel produceret af planteaffald er en oplagt mulighed i transportsektoren og til opvarmning af huse. Men der skal laves analyser for indpasningen af biomasse i energisystemet i forhold til økonomi og CO<sub>2</sub>-regnskaber.
- Fusionsenergi har stort potentiale som CO<sub>2</sub>-fri energikilde. De første kommercielle kraftværker forventes færdige i 2045.
- Jordvarme og bølgekraft har potentiale og kan med passende politiske incitamenter få en rolle i fremtidens energiforsyning.

Rapporten kan findes på: [www.risoe.dtu.dk](http://www.risoe.dtu.dk)

Der er stort behov for at reducere energiforbruget i både vores hjem og på arbejdspladserne. Samtidig skal flere energikilder indpasses i energisystemet på en bæredygtig måde, der også tager hensyn til klimaet. Risø udvikler værktøjer, der kan bruges her til.

givent scenarios konsekvens for samfundet. Analyserne krævede selvsagt mange data, og Danmarks Statistik og elværkerne blev meget hurtigt tætte samarbejdspartnere.

Gruppens ansvarsområder blev tilpasset regeringens energipolitik og skulle således sidst i 70'erne beskæftige sig med energibesparelser, omlægning til nye brændselsformer og kombineret kraft-varme-produktion. Men i mange år var hovedopgaven at bistå Varmeplanudvalget og udarbejdelse af energiplaner. I 1980'erne skete der store ændringer i Danmarks energiforsyning. Indførslen af kraft-varme-værker, naturgas, fjernvarme og vindkraft mange steder i landet, gjorde forudsigelserne om energisektorens udvikling og dens samspil med samfundet ekstra komplicerede og krævede forbedringer af de analysemodeller, som systemanalysegruppen havde udviklet. Samtidig blev de miljø- og sikkerhedsmæssige krav skærpet, og som en konsekvens blev det relevant at samle de grupper på Risø, som arbejdede med netop de to problemstillinger, i én afdeling. Derfor besluttede direktionen på Risø at lægge Energisystemgruppen sammen med Risikoanalysegruppen pr. 1. januar 1985. Den nye enhed fik navnet Afdelingen for Systemanalyse og Hans Larsen blev udpeget som afdelingschef. Oprettelsen af den nye afdeling var også en konsekvens af, at atomkraften i Danmark lige havde fået det endelige dødsstød politisk.

»Helt tilbage i starten var Risø jo her for at dyrke emnet a-kraft, indtil det blev opgivet i 1985, fordi Folketinget besluttede, at fravælge den mulighed. Oprettelsen af Afdelingen for Systemanalyse og Afdelingen for Vindenergi kom i direkte forlængelse af den beslutning.« forklarer Hans Larsen.

## FRA FORSYNINGSSIKKERHED TIL BÆREDYGTIGHED

Et par år senere blev FN's Brundtland-handlingsplan fra 1987 et vendepunkt for Energisystemgruppens arbejde. Rapporten forudså, at lagrene af fossile brændstoffer ville slippe op, og at klimaet måske kunne gå hen og blive den største udfordring for den energimæssige udvikling overhovedet. Med ét slag var klimaet kommet på den politiske dagsorden ikke kun herhjemme, men verden rundt. Den daværende energiminister, Jens Bilgrav-Nielsen, i Schlüters KVR-regering, havde klimaet som mærkesag og inviterede i 1990 Afdelingen for Systemanalyse til at bistå ministeriet i arbejdet bag en meget stor og radikalt anderledes energiplan, end der tidligere var blevet lavet.

»Hvor det indtil 1990 overvejende var forsyningssikkerhed, der var i fokus, blev det nu også klima og bæredygtighed, der stod som fællesnævner for, hvad vi skulle gøre. Det var første gang, at bæredygtighed blev sat i centrum i energiplanlægningen, og det har været det bærende element lige siden,« forklarer Poul Erik Morthorst, som var hovedansvarlig for Risøs deltagelse i arbejdet med





Handlingsplan for en bæredygtig udvikling – Energi 2000. Gruppen arbejdede på opgaven i næsten halvandet år og i samarbejde med ministeriet opstillede den en række scenarier for udviklingen frem til 2025. Scenarierne har siden hen dannet baggrund for det videre arbejde inden for området. I Energi 2000 kom eksperterne frem til, at der var behov for nogle ret banebrydende omlægninger af energisystemet. Der skulle blandt andet indføres meget mere vedvarende energi, og store energibesparelser var nødvendige.

»Der var bred politisk konsensus om at følge retningslinjerne i planen. Så Folketinget indførte de konkrete målsætninger, som planen anbefalede,« fortæller Poul Erik Morthorst og fortsætter: »Det var før Kyoto, men det var vores første skridt i den retning. I Danmark var vi rent faktisk nogle af de første i Europa, der for alvor fik klimaproblematikken med i energipolitikken«.

### RISØ I FRONT

At Danmark har taget klimaet seriøst meget tidligt, har givet Risø en førerposition i udviklingen af nye vedvarende energi-teknologier, som har smittet af på Afdelingen for Systemanalyses samarbejde og konkurrence med udlandet.

»I forhold til lignende grupper i udlandet arbejder vi naturligvis meget med de samme problemstillinger. Men i og med, at Danmark har gjort det så godt med vedvarende energi generelt, og især vindkraft, er det Risø, folk ringer til, hvis de vil vide, hvordan vindkraft indpasses i de store energisys-

stemer,« påpeger Poul Erik Morthorst. En ting er nemlig teori, noget andet er kendsgerninger og data, og dem har Risø. Med Danmarks efterhånden mangeårige erfaring med vindkraft er der indhøstet mange erfaringer og indsamlet mange data for, hvordan vindkraften fungerer sammen med de øvrige energisystemer. Denne viden bliver brugt i systemanalysemodellerne, i kombination med den tætte adgang til hele den teknologiske viden inden for vedvarende energi, som Risø besidder. På den måde har Afdelingen for Systemanalyse formået at udvikle stærke analysemodeller. Førrepositionen inden for vedvarende energi har også betydet, at det er blevet nemmere at finde penge til forskningen i Danmark såvel som i udlandet, og en stor del af forskningen foregår i tæt samarbejde med udenlandske partnere.

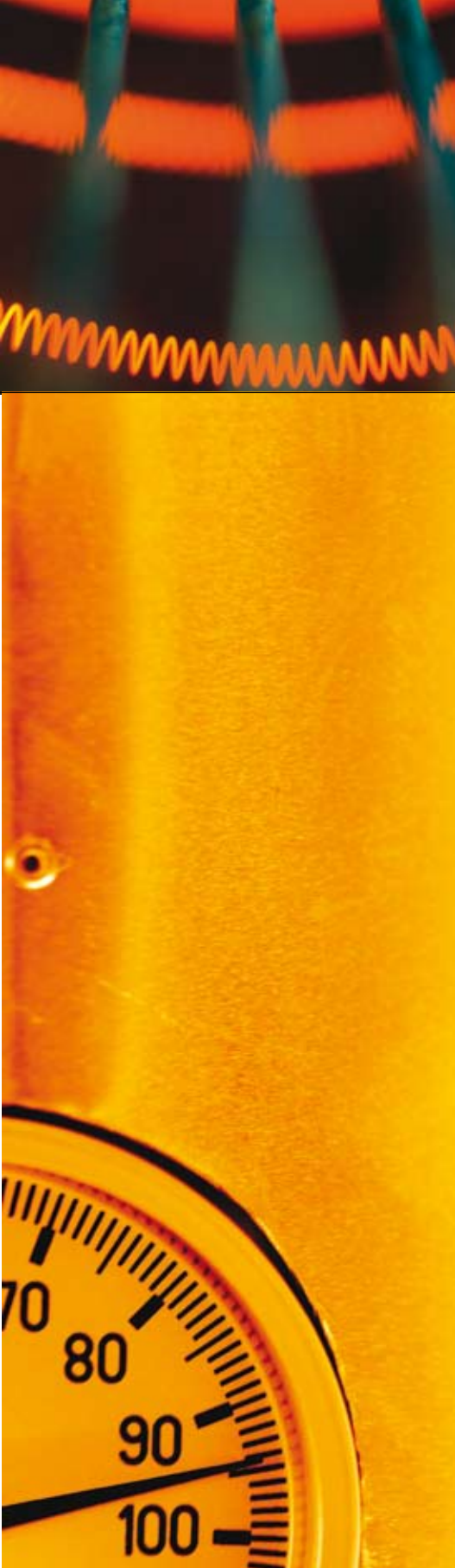
Med den plan EU's ministerråd vedtog i marts 2007 for at mindske konsekvenserne af klimaforandringerne, er der mere end nogensiden brug for viden om, hvordan energisystemer fungerer og kan indrettes. Andelen af vedvarende energi skal op, forsyningssikkerheden forbedres og afhængigheden af importerede fossile brændstoffer skal ned. CO<sub>2</sub>-kurven skal knækkes, således at vi kan gå en fremtid i møde, hvor udledningerne er det halve af i dag eller endnu mindre, forklarer Hans Larsen.

Det er altså ikke længere et spørgsmål, om vi skal gå i retning af bæredygtige energikilder og vedvarende energi, men nærmere om, hvordan og hvor hurtigt vi skal opnå et bæredygtigt samfund. Den helt store udfordring bliver derfor, at få omlagt energisystemet tilstrækkeligt hurtigt. Heldigvis viser historien, at det kan gå hurtigere og bedre end forventet. I Energiplan 1981 blev det forudset, at vi ville have 50.000 små vindmøller i Danmark i 2005, der tilsammen ville have en kapacitet på 2.500 MW. Virkeligheden blev 5.000 møller, men til gengæld blev kapaciteten 700 MW større end forventet, altså i alt 3200 MW i 2005.

»Dengang troede vi ikke, at mere end 10 procent af Danmarks samlede elforbrug kunne dækkes med vindkraft, men i dag er vi oppe på 20 procent,« fortæller Poul Erik Morthorst. På Risø er de da heller ikke i tvivl om, at det kan lade sig gøre at opfylde målsætningerne. Men der skal handles nu.

»Det er nu brikkerne i puslespillet skal falde på plads, hvis vi skal nå at fordoble andelen af vedvarende energi fra 15 procent til 30 procent de næste 12 år frem til 2020. Hvis det skal lykkes, skal vindkraften op på minimum 50 procent af elforbruget, og det er en stor udfordring at indpasse så stor en mængde vindkraft i elsystemet« forklarer Poul Erik Morthorst og Hans Larsen supplerer:

»Vi skal bidrage til, at løsninger bliver lidt bedre, end de ellers ville have været, og arbejde for at nye avancerede energiteknologier bliver taget i brug lidt hurtigere, end de ellers ville have gjort. Kan vi få to procent vedvarende energi mere ind i systemet to år tidligere, så har vi gjort vores job,« siger han.



## SYSLAB – fra teori til praksis

87

Masser af vindmøller til lands og til havs leverer energien i fremtidens energisystemer kombineret med biobrændsel og solceller på taget. Intelligent strømforbrug, hvor vaskemaskinen, fryseren og andre elektriske apparater reguleres automatisk efter elprisen og vejrforhold, udjævner energiforbruget. Plug-in-biler med batterier og kraftvarmeværker med brændselsceller i husene kan planlægge hvornår 'tanken' fyldes til næste uges forbrug. Derved erstattes benzin og olie med energilagre, der fyldes, når vinden blæser. I fremtidens energisystem vil tæt på 100 procent af energien på denne måde stamme fra vedvarende energi, og energiproduktionen bliver fordelt på mange distribuerede enheder. Det stiller væsentligt øgede krav til energisystemets styring sammenlignet med det klassiske elsystem, hvor ganske få store kulkraftværker delte ansvaret for energiforsyningen.

Risø har taget udfordringen op og udviklet SYSLAB, der er et virkeligt system i skaleret form, hvor flere geografisk spredte produktionsenheder er koblet sammen. Et er nemlig teori og simulering af energisystemer i computermodeller, noget andet er at gøre det. Virkeligheden er sjældent beskrevet perfekt ved simple modeller, og præcise parametre til modellerne opnås først i selve driftsituationen.

Alle enheder i SYSLAB er styret af sin egen computer med indbygget intelligens, som kan forholde sig til situationer i elnettet og reagere, når forbruget eller elproduktionen ændrer sig. Strømmen produceres af to vindmøller, et solcellepanel, en dieselgenerator, og et vanadiumbatteri i containerstørrelse fungerer som ellager. Forskernes kontorbygning, med belysning, elradiatorer og kaffemaskiner samt en plug-in-bil, gør det ud for forbrugerne. Systemet kan kobles til det sjællandske elnet, der både kan agere yderligere forbrugere eller generatorer.





## Klimaet er blevet det nye projekt

**SOLEN SKINNER, FUGLENE** synger, og selv om kalenderen kun lige er skiftet fra vinter til forår, er vinden ikke længere råkold. Der er så meget forår i luften, at man kunne tro, at vi ikke var i 2008, men allerede i sidste halvdel af det 21. århundrede og for alvor kunne mærke effekterne af den globale opvarmning. På en måde er vi det faktisk også. I hvert fald oppe på toppen af Brandbjerg, en forblæst og i årevis uberørt lyng- og græsklædt bakke i et militært øvelsesterræn lidt uden for Jægerspris i Nordsjælland. Her har danske forskere med programleder Claus Beier fra Afdelingen for Biosystemer på Risø i spidsen nemlig bygget en sindrig tidsmaskine, der kan skrue tiden frem til 2075.

Larsen B-iskappen 7. marts 2002 efter den kollapsede. På blot lidt over en måned brød et 3.250 kvadratkilometer stort islag sammen og begyndte at flyde væk. Før kollapset var kappen omkring 220 meter tyk. Sammenbruddet af Larsen B blev i flere år set som et af de mest åbenlyse tegn på, at global opvarmning påvirker polarregionerne. Nu er der mange flere.



**FN's Brundtland-rapport fra 1987 satte klimaet på den politiske dagsorden. Risøs viden om energisystemer kunne bruges i en mere bæredygtig energiplanlægning. Placeringen på Risø af FN's center for energiplanlægning i u-lande og arbejdet i FN's Klimapanel har givet Risø en central rolle i international energiplanlægning.**

Konstruktionen tiltrækker klimaeksperter fra hele verden, og det er blot en af mange eksempler på, at det tidligere forsøgsanlæg for atomkraft ved Roskilde Fjord i dag i manges øjne betragtes som ét stort center for klimaforskning. Tilmeldt et internationalt set meget anerkendt et af slagsen.

Tidsmaskinen i Jægerspris – det såkaldte CLIMAITE-projekt – simulerer effekten af klimaforandringerne på vegetation. Den består af små forsøgsgelter med lyng, græs og urter, der får pumpet drivhusgassen  $\text{CO}_2$  ud over sig. På den måde øges mængden af  $\text{CO}_2$  i luften omkring planterne til det niveau, FN's klimapanel regner med, at det vil være i 2075. Den forventede temperaturstigning simuleres ved, at man kan køre skærme ud over planterne om natten for at holde på varmen. Det hæver gennemsnitstemperaturen med to grader. Skærmene kan også sørge for, at planterne udsættes for de lange tørkeperioder, man regner med bliver almindelige om sommeren i Danmark i slutningen af det 21. århundrede.

Netop derfor har forsøget international bevågenhed. Det er unikt ved, at man, bl.a. takket være en stor bevilling fra Villum Kann Rasmussen Fonden, har fået de tre afgørende faktorer med:  $\text{CO}_2$ , vand og temperatur. Udenlandske forsøg har nemlig vist, at man ikke bare kan lægge effekter fra studier af hver enkelt af de tre faktorer sammen. For eksempel konkluderede et amerikansk forsøg, at planter voksede 10 procent mere end normalt ved forhøjede temperaturer, og 10 procent mere ved forhøjet  $\text{CO}_2$ . Men 10 procent mindre med både forhøjet temperatur og forhøjet  $\text{CO}_2$ .

»Det viser, at i biologisk forskning – og i klimaforskning generelt – er to og to langt fra altid fire,« siger Claus Beier, der også er projektleder på CLIMAITE. Men hvad er to og to så på toppen af Brand-



Computergenererede billeder af det skrumpende isdække ved Nordpolen i 1979 (ø.v.) og 2003 (midt). Billederne er baseret på satellitmålinger. Nederst ses en tropisk cyklon fra rummet. Disse meget voldsomme storme menes at ville stige i antal og intensitet med et varmere klima.

bjerg ved Jægerspris? Det vender vi tilbage til, først en tur den anden vej i tidsmaskinen: Tilbage til dengang, hvor Risøs indsats på klimaområdet begyndte.

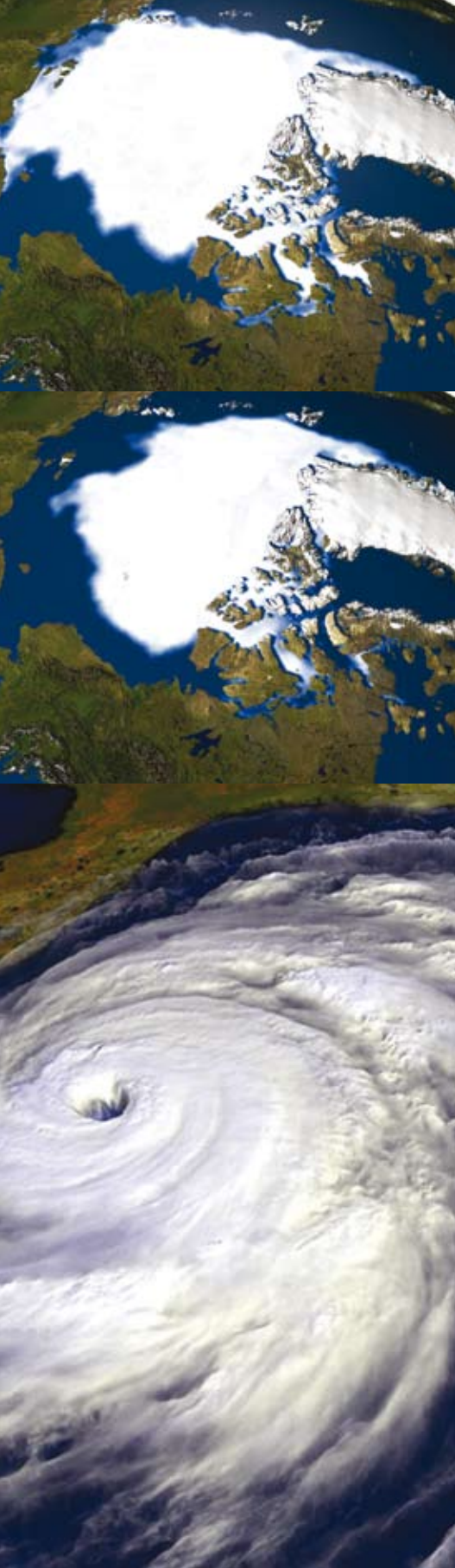
### KLIMA KOMMER I FOKUS

Da FN's såkaldte Brundtland-rapport om bæredygtig udvikling i 1987 satte klimaproblematikken på den internationale politiske dagsorden, var Risø allerede på vej væk fra det oprindelige fokus på atomkraft. Efter Folketingets endelige nej til kernekraft i 1985 var Risø blevet et langt bredere energiforskningscenter. Det betød, at de metoder til pålideligheds- og risikoanalyse, der oprindeligt var udviklet til vurdering af forholdene ved rumfart og atomkraftværker, i stigende grad blev anvendt til at opnå større driftssikkerhed af industrielle anlæg.

1980'ernes kraftige omlægning af energisystemerne og skærpelsen af de miljø- og sikkerhedsmæssige krav havde i 1985 ført til oprettelsen af Afdelingen for Systemanalyse, hvor Hans Larsen blev chef. Afdelingen var en lidt atypisk konstruktion med en usædvanlig multidisciplinær sammensætning af fysikere, ingeniører, økonomer og sågar humanister, der ofte havde forskellige indfaldsvinkler og synspunkter. Men netop de diskussioner, der var nødvendige for at udrede trådene, har ifølge ansatte været en af afdelingens styrker – uden dem havde man ikke fundet de koblinger mellem de forskellige fagområder, der er nødvendige for at lave holdbare analyser.

Afdelingen havde forenklet sagt to hovedopgaver: Man skulle lave analyser, der forudså udviklingen. Og man skulle beregne sig frem til konsekvenserne for økonomien og andre faktorer af valg af energiformer. Et typisk eksempel fra dengang var en undersøgelse af samspillet mellem vindmøllers tekniske pålidelighed og deres økonomiske muligheder på energimarkedet. Brundtland-rapporten og de efterfølgende politiske dønninger i Danmark betød, at også klimaforandringerne blev en del af Afdelingen for Systemanalyses arbejdsområde. KVR-regeringens for den tid meget ambitiøse Energiplan 2000 fra 1990 – som Risø havde en afgørende rolle i udformningen af – fastslog, at nu skulle der for alvor skæres i den vestlige verdens energiforbrug for at begrænse de globale miljøproblemer.

Energiplan 2000 lagde vægt på sammenhængende løsninger, der på én gang tog hensyn til ressourceforbrug og til samtlige aspekter af miljøet. Derfor kom der endnu mere fokus end tidligere på miljømæssig planlægning og økonomiske analyser af de miljømæssige konsekvenser. Det skabte et øget behov for afdelingens analyser. Samme år, i 1990, etablerede Udenrigsministeriet og Risø sammen med FN's miljøprogram UNEP en ny enhed på Risø: UNEP Collaborating Centre for Energy and Environment (UCC) – i dag UNEP Risø Centre – med det formål at styrke integrationen af miljøhensyn i



## Hvad er global opvarmning?

91

- Jorden er blevet cirka 0,7 grader varmere de seneste 100 år. Det er så kraftig og hurtig en opvarmning, at de flere tusinde eksperter i FN's klimapanel, IPCC, mener, at langt det meste skyldes en menneskeskabt påvirkning, og at temperaturen i fremtiden vil fortsætte opad.
- Synderen er drivhusgasser: metan, CFC, ozon og især  $\text{CO}_2$ , der er hovedaffaldsproduktet fra fossile brændstoffer som kul, olie og naturgas. Drivhusgasser findes naturligt i atmosfæren, hvor de holder noget af varmen fra solen tilbage fra at forsvinde tilbage ud i rummet. Men menneskeskabt udledning af  $\text{CO}_2$  har øget mængden til niveauer, der er langt over, hvad man har haft i de sidste mindst 600.000 år. Det betyder, at mere af varmen bliver holdt tilbage, og klimaet bliver varmere.
- Hvor meget varmere det vil blive, afhænger bl.a. af, om og hvornår alverdens ledere kan blive enige om at knække  $\text{CO}_2$ -kurven. Men IPCC kalkulerer i sin seneste rapport fra 2007 med, at det bliver mellem 1,8 og 4,0 grader celsius varmere i gennemsnit i 2100 end i dag.
- Det betyder mindre is, især omkring Nordpolen, og sandsynligvis store oversvømmelser, især i den fattige del af verden. Flere mennesker ventes at få problemer med at skaffe rent drikkevand.
- De industrialiserede lande undtagen USA har i Kyoto-protokollen aftalt at reducere deres udledning med godt fem procent fra 1990-2012. Der er håb om at nå en langt mere ambitiøs aftale på klimatopmødet i København december 2009. Håbet er her at få også USA og store udviklingslande som Kina, Indien og Brasilien til at forpligte sig.
- IPCC, med bl.a. Risø-forskeren Kirsten Halsnæs, vurderer, at klimaforandringerne kan holdes under tre grader ved blot at bruge lidt over en procent af verdens BNP. Deres analyse tyder på, at det vil være langt dyrere ikke at gøre noget, og jo længere vi venter, jo dyrere bliver det.

Kilder: IPCC m.fl.



energiplanlægningen i udviklingslande. Formålet var – og er – at fremme anvendelsen af energiformer, der kan medvirke til at begrænse miljøbelastningerne, især drivhuseffekten.

### HVAD FOR ET KLIMAPROBLEM?

Lederen af UNEP Risø Centre, John Christensen, og andre forskere fra Risø var fra begyndelsen involveret i arbejdet i FN's klimapanel, der også blev etableret i 1990. Men trods en livlig international diskussion om klimaforandringerne op gennem 1990'erne, var feltet ikke noget, der fyldte særlig meget i Risøs generelle selvforståelse. I Risøs 560 sider store 40-års jubilæumsbog fra 1998 – få måneder efter Kyoto-aftalen om begrænsning af CO<sub>2</sub>-udledningen blev indgået – er klimaspørgsmålet kun nævnt perifert i enkelte delafsnit.

»Risøs historiske tilgang har jo ikke været at arbejde med klima, og det prægede indstillingen meget længe. Mange folk vidste ikke rigtig, hvad Kyoto-aftalen var, heller ikke herude. Der var som sådan ingen, der direkte havde noget imod at tale om klimaproblematikken, men det optrådte uhyre sjældent som et fokusområde,« fortæller Hans Larsen. Ifølge ham udtrykte dette dog mere en refleksion af den generelle politiske og offentlige bevidsthed om problemerne end en egentlig prioritering.

Regeringsskiftet i november 2001 understregede dette. Den nye regering lyttede til de skeptikere, der satte spørgsmålstegn ved, om klimaforandringerne nu også var så stort et problem, som FN's klimapanel mente, og en række initiativer omkring klima og vedvarende energi, nu kerneområder for Risøs forskning, blev lagt på is. Risøs aktiviteter på området gik dog ikke i vinterhi af den grund

– hverken i UNEP-centret, Afdelingen for Systemanalyse eller de store del af Risø, der bidrog til klimaforskningen ved at udvikle nye energiteknologier – nærmest tværtimod. Afdelingen for Systemanalyse blev i denne periode repræsenteret i bestyrelsen i FN's Klimapanel – først af John Christensen og fra 2003 af Hans Larsen. Og Risø-forskere som Kirsten Halsnæs, Jørgen Fenhann og Amit Garg blev involveret som videnskabelige hovedforfattere på FN-panelets fjerde rapport, der blev udarbejdet i perioden fra 2001 til 2007.

»Man kan sige, at vi bare fortsatte med det, som altid havde været Risøs hovedarbejde: at udvikle ny energiteknologi, der kunne sikre forsyningen ved at erstatte olien, samtidig med at det måske også kunne fremme erhvervslivets interesser,« fortæller Hans Larsen.

I samme periode arbejdede man i UNEP Risø Centre med at videreudvikle Kyoto-protokollens såkaldte Clean Development Mechanism: CDM-mekanismen, hvor industrialiserede lande køber retten til at udlede mere CO<sub>2</sub> ved at investere i projekter, der nedbringer udledningen i udviklingslande. Ideen er dels, at der kommer gang i udviklingen i de fattige lande, dels at det giver mere mening i det store regnskab at lave reduktionerne, hvor man får mest for pengene, blandt andet fordi vi i Vesten allerede har plukket de såkaldt lavthængende frugter: de relativt nemme energibesparelser. I den fattigere del af verden kan man stadig få rigtig meget miljø for pengene ved at investere i skorstensfiltre, rensningsanlæg og andre tiltag, der efterhånden er standard i den vestlige verden.

## VINDEN VENDER

Selv om UNEP Risø Centre og det øvrige klimaarbejde arbejdede videre under 'klimaskeptiker-perioden', var det alligevel en lettelse for forskerne, da de politiske vinde vendte, og VK-regeringen i perioden fra 2004 og frem blev stadig mere grøn og klimaprogressiv. Risø fik nye opgaver, f.eks. var UNEP Risø Centre med til at forme Danidas nye strategi for udvikling og klima, hvor hensynene til klimaet skulle tages med i planlægning af udviklingsprojekter. Centret, der begyndte beskeden med blot fire ansatte, har nu 30 medarbejdere og har gradvist øget projektaktiviteterne og dermed fået større muligheder for at udbrede miljø- og klimavenlige energikilder i udviklingslande – der jo bliver hårdest ramt af klimaforandringerne, men har dårligst kapacitet til at afbøde virkningerne.

Det hele kulminerede – foreløbig – i 2007 med klimafokus på G8-mødet og ved FN's årlige generalforsamling og med den usædvanlig brede anerkendelse af rapporterne fra FN-klimapanel, ikke mindst i form af Nobels fredspris, som derved også kom lidt til Risø. Og på den hjemlige politiske scene blev der vedtaget en ny energiplan.

»På blot et par år er det politiske klima nærmest blevet vendt op og ned. Selv om der stadig nogle gange i medierne kommer et par Rasmus Modsats-pip, er den globale opvarmning generelt blevet så ultimativt accepteret, at det er endt med at være upassende at tale imod, nærmest som at fornærme sin gamle bedstemor. Det gør man bare ikke,« konstaterer Hans Larsen.

»Omvendt ligger det dog heller ikke i luften, at problemet skal løses ved, at vi lider store afsavn og kun må spise varm mad to gange om ugen,« indskyder John Christensen – og Hans Larsen nikker: »Løsningen på klimaproblemet skal gå hånd i hånd med fortsat udvikling og vækst. Det er bl.a. derfor, at Risø er og efter alt at dømme fortsat vil være en central spiller. Vi har lang erfaring på det felt: at udvikle renere energiteknologier, der kan betale sig,« påpeger han. Blandt de renere teknologier, der kan være med til at løse klimaproblemet, fremhæver han især brint og superbatterier, der kan indeholde meget mere strøm per kilo, og som er hurtigere at oplade.

### RISØ SKABER VIDEN OM NATURENS REAKTION

Også på Brandbjerg – tidsmaskinen ved Jægerspris – er Risø-forskere i færd med at spå kvalificeret om fremtiden. Det væsentligste overordnede spørgsmål i forsøget er, om økosystemerne vil reagere som en buffer i forhold til klimaforandringerne eller tværtimod vil forstærke dem: Vil planterne kunne modstå tørken og varmen og udnytte den ekstra CO<sub>2</sub>, så de vil vokse mere og optage mere CO<sub>2</sub> fra luften? Eller vil den højere temperatur øge hastigheden af forrådnelsen af døde plantedele så meget, at de vil afgive mere oplagret kulstof fra jorden, så drivhuseffekten derved accelererer?

De første resultater har tydet på, at planterne er i stand til at klare tørkeperioderne bedre og opretholde en relativt god vækst, når CO<sub>2</sub>-indholdet i luften forøges, og det vil modvirke, at drivhuseffekten vil accelerere. Men det er endnu for tidligt at sige, hvordan samspillet mellem alle de tre faktorer vil være. Der er dog også andre udfordringer for naturen. Nogle planter er bedre til at tilpasse sig end andre, og vil derved lettere overleve og brede sig, og nye arter vil kunne indfinde sig, mens andre måske vil bukke under og forsvinde. Brandbjerg-forsøget, der foreløbig kører frem til 2013, er med til at illustrere, at man ikke kan forurene, uden at det har konsekvenser for økosystemerne. Og de tre klimaforskere Claus Beier, Hans Larsen og John Christensen føler alle, at de har et medansvar for at skabe den viden, som er et nødvendigt grundlag for de politiske og teknologiske løsninger, der skal sikre, at menneskeheden klarer udfordringen. Det er her de og forskningscentre som Risø har en mulighed for at gøre en forskel. De er sådan set ikke i tvivl om, at Jorden som planet nok skal overleve:

»Men med den globale opvarmning bringer vi mange dyre- og plantearter i fare. Og i yderste konsekvens også os selv,« påpeger John Christensen.





## Sådan hjalp UNEP Risø Centre indiske børn til bedre karakterer

95

Det nytter sjældent noget at støtte salg af produkter, der aldrig vil kunne klare sig på markedsvilkår. Men hvad nu, hvis markedet bare skal have et lille skub for at blive effektivt? Sådan tænkte UNEP Risø Centre, da det i 2003 udviklede det såkaldte Indian Solar Loan Programme sammen med to af de største kommercielle banker i Indien, Canara Bank og Syndicate Bank. Programmet fik i maj 2007 en Energy Globe Award, den såkaldte energi-oscar.

Programmet betød nemlig, at det i to indiske delstater blev nemmere at låne til et solcelleanlæg. Køberne skulle betale 15 procent i depositum mod normalt 25 procent, og tilbagebetalingstiden blev forlænget fra tre til fire år. Desuden blev procedurerne for lånet forenklet. Projektet blev en succes, fordi der er stor mangel på stabil energi og elforsyning ude i de indiske landområder. De to banker har tjent penge, og der er nu et så stabilt investeringsklima for mindre solcelleanlæg, at de øvrige banker i områderne er hoppet med på rene markedsvilkår. De 17.000 solgte solcelleanlæg betyder, at 100.000 mennesker har fået et lidt lettere liv: Anlæggene giver mulighed for en lille håndfuld 20- eller 40-watts-pærer og måske, at en radio, et tv eller en ventilator kan køre rundt et par timer hver aften.

Den ekstra elektricitet har blandt andet betydet, at skolebørn får bedre karakterer, fordi de nu kan læse lektier, efter at det er blevet mørkt. Samtidig er produktiviteten blandt de mindre fabrikker og hjemmeproduktioner øget væsentligt.

UNEP-projektet har også bredt sig til andre delstater i Indien, og lignende projekter i Kina, Indonesien, Mexico, Ghana, Egypten, Marokko og Algeriet er på vej.

**FOTOGRAFER**

- Forside: Thomas Arnbo  
s. 4: Thomas Arnbo/Risø DTU  
s. 5: Thomas Arnbo/Risø DTU  
s. 7: Marianne Ryde/Risø DTU  
s. 8: Risø DTU, Risø DTU, Risø DTU, Risø DTU  
s. 9: Risø DTU  
s. 10: Risø DTU  
s. 11: Risø DTU  
s. 13: Boye Koch/Risø DTU, Risø DTU  
s. 14: Risø DTU  
s. 15: Boye Koch/Risø DTU  
s. 16: Boye Koch/Risø DTU  
s. 17: Risø DTU  
s. 18: Boye Koch/Risø DTU  
s. 21: Risø DTU, Boye Koch/Flemming Rasmussen/Risø DTU  
s. 22: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 23: DTUs Studiekatalog 2008  
s. 25: Risø DTU, Boye Koch/Risø DTU  
s. 26: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 27: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 28: Lars Thornblad/Risø DTU  
s. 29: DTUs Studiekatalog 2008, Lars Thornblad/Risø DTU  
s. 30: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 32: Boye Koch/Risø DTU  
s. 33: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 35: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 36: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 37: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 38: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 40: Lars Thornblad/Risø DTU  
s. 41: Morten Corneliussen, Exit Fotostudiet/Risø DTU, Lars Bahl/Risø DTU  
s. 43: Lars Bahl/Risø DTU, Lars Bahl/Risø DTU  
s. 44: Lars Bahl/Risø DTU, Lars Bahl/Risø DTU  
s. 45: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 46: Risø DTU  
s. 47: Lars Bahl/Risø DTU, Lars Bahl/Risø DTU  
s. 48: EFDA-JET  
s. 49: Risø DTU  
s. 51: Lars Thornblad/Risø DTU  
s. 53: EFDA-JET; Göran Scharmer, Kai Langhans, ISP/Kungl. Vetenskapsakademien  
s. 54: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 55: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 56: Lars Thornblad/Risø DTU, Lars Thornblad/Risø DTU  
s. 59: Gitte Sofie Hansen/Risø DTU  
s. 60: Risø DTU  
s. 61: Risø DTU  
s. 63: Lars Bahl/Risø DTU, DTUs Studiekatalog 2008  
s. 64: Boye Koch/Risø DTU, Lars Bahl/Risø DTU  
s. 67: Boye Koch/Risø DTU; Boye Koch/Risø DTU  
s. 68: Lars Bahl/Risø DTU, Lars Thornblad/Risø DTU  
s. 69: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 70: Risø DTU, Lars Bahl/Risø DTU, Lars Bahl/Risø DTU  
s. 72: Boye Koch/Risø DTU  
s. 73: Risø DTU  
s. 75: Risø DTU, DTUs Studiekatalog 2008  
s. 76: Lars Thornblad/Risø DTU, Lars Thornblad/Risø DTU  
s. 79: Dansk Dekommissionering, Dansk Dekommissionering, Dansk Dekommissionering  
s. 80: Lars Thornblad/Risø DTU  
s. 81: Lars Bahl/Risø DTU  
s. 83: Lars Thornblad/Risø DTU, Lars Bahl/Risø DTU  
s. 85: Lars Bahl/Risø DTU, Lars Thornblad/Risø DTU  
s. 87: Lars Bahl/Risø DTU, Lars Bahl/Risø DTU  
s. 88: NASA/GSFC/LaRC/JPL, MISR Team  
s. 89: Lars Thornblad/Risø DTU  
s. 91: NASA, NASA, NASA  
s. 92: Lars Thornblad/Risø DTU, Lars Thornblad/Risø DTU  
s. 95: DTUs Studiekatalog 2008

**Risø DTU**  
Nationallaboratoriet  
for Bæredygtig Energi



ISBN: 978-87-550-3669-7

